

石炭灰の海砂代替材への適用に関する研究

車田 佳範* 中島 勝治*
泉 雄士**

要 旨

平成9年度における全国の石炭灰の発生量は約730万トンであり、そのうち有効利用量は約68%、残りの32%は埋立処分されている。分野別では、セメント材料としての有効利用が約65%を占めているが、今後の大幅な需要の増加が期待できないことから、新たな有効利用方法の開発が急務となっている。

一方、土木分野においては、環境への影響より海砂の採取が規制されつつあることから、サンドコンパクションパイル工法などの地盤改良工事に必要な良質の海砂の不足が指摘されている。

このような背景より、石炭灰を固化造粒して海砂の代替材料として有効利用しようとする試みが各電力会社で調査・研究されている。当社においては、中国電力(株)土木部との共同研究により、連続式の高速多機能混合機による石炭灰の固化造粒手法を開発し、また当手法によって作製した造粒物が代替材料としてほぼ適用できることを確認したのでその結果を報告する。

1. まえがき

一般産業も含んだ全国の石炭灰の発生量は平成9年度で約730万トンであり、平成18年には1,200万トンにも及ぶと推測されている¹⁾。

このうち平成9年度における石炭灰の有効利用量は約68%、500万トンであり、残りの32%、230万トンは灰処分場に埋立処分されている。分野別の有効利用状況をみると、セメント分野での原材料としての利用が約65%を占めており、土木分野での利用は現在のところ10%程度である。しかしながら近年、セメント材料には、建設汚泥や焼却灰を有効利用したものも開発されるようになってきており、この分野で将来に渡り現在の数量の石炭灰が消化できるとは考えにくい。また埋立処分については、環境保全の観点からその新規確保は困難になってきており、加えて「リサイクル法(平成3年)」では石炭灰の有効利用の促進が強くうたわれていることから、新たな有効利用手法、特に大量消費の期待できる土木材料としての有効利用技術の開発が急務となっている。

一方、土木分野においては、これも環境保全の理由から、海砂の採取が全国的に規制されつつあり、サンドコンパクションパイル工法(以下、SCP工法という)およびサンドドレーン工法などの地盤改良工事に必要な良質砂の確保が困難になってきている。このため、その代替材としてマサ土を砕いて粒度調整した加工砂、製鉄所から発生するスラグ、あるいは人工排水材等の各種材料の地盤改良材としての適用性が検討されつつある。

このような背景の中、石炭灰を固化造粒して海砂の代替材料として有効利用しようとする試みが各電力会社で調査・研究されている²⁾。この中でも中国電力(株)は、三

隅、大崎の両火力発電所の運営開始による石炭灰発生量の増大、瀬戸内海での海砂採取禁止などの理由から、最優先課題として石炭灰の有効利用促進に取り組んでおり、当社も平成10年より同電力土木部との共同研究を行い、石炭灰の固化造粒技術を開発してきた。

このたび、連続式の高速多機能混合機による石炭灰の固化造粒技術を新たに開発し、作製した造粒物がSCP工法における砂の代替材料として適用可能であることを確認したのでその経緯および結果を報告する。

2. 造粒技術の開発

2.1 石炭灰の一般的性質

写真-1に、石炭火力発電所から発生する石炭灰の標準的な性状を示す。またその粒度分布を図-1に、物理特性を表-1にまとめて示す。

石炭灰は、その粒度分布からはシルト~粘土にほぼ分類されるが、コンシステンシー特性は、液性・塑性限界



写真-1 石炭灰

*技術研究所 **中国支店

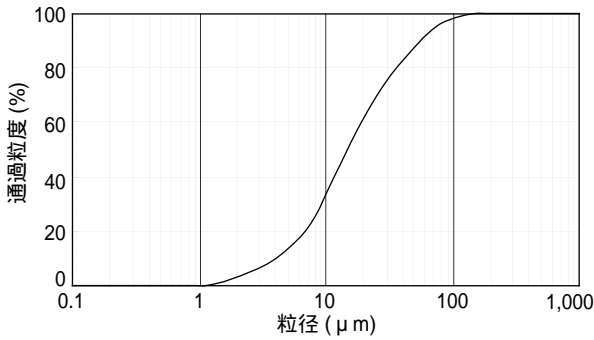


図 - 1 石炭灰の粒度分布

表 - 1 石炭灰の物理特性

項目	単位	物性値	化学組成
強熱減量	%	2.66	
MB吸着量	mg/g	0.39	
フロー値	%	106.0	
比表面積	cm ² /g	2,700	
活性度(28日)	%	85.2	
液性限界	%	N.P.	
塑性限界	%	N.P.	

ともにN.P.であるなど、非常に微細な砂といった性質を有している。また、粒子の形状は全くの球形であり保水性に乏しいことなどから、石炭灰を混入した流動化処理土においては、ブリージング量が増加することが報告されている³⁾。

2.2 造粒機の選定

粉粒体を造粒する技術は、主に食品、飼料、医薬関連の事業を中心に既に実用化されており、用途に応じて種々の造粒技術が存在している。表 - 2 に、代表的な造粒方法の分類を示す⁴⁾。

表 - 2 造粒方法の分類

一般分類	略図	形状	結合力
転動式	 パン型 ドラム型	球	水の毛細管力による保形結合力または粘性体による粘着結合力
押し出し式	 スクリーン前押し出し	円筒	圧縮応力に伴う粘性体による粘着結合力
圧縮式	 ブリケットマシン	レンガ	圧縮応力に伴う粘性体による粘着結合力あるいは分子間力
攪拌式	 攪拌翼混合型	球	水の毛細管力による保形結合力または粘性体による粘着結合力

石炭灰の造粒を例に挙げれば、既に転動式のパン型造粒機による実績がある⁵⁾。しかし今回の研究においては、材料供給・搬出の連続性がプラント構造の単純化を考慮し、原材料の攪拌混合と造粒が同時にできる攪拌混合式の造粒機を採用することとした。

採用した造粒機の一般的な名称は、「スキ型ショベル羽根式高速混合機(連続タイプ)」であり、以降「連続式ミキサ」と略して称することとする。

図 - 2 に、今回採用した連続式ミキサの概要図を示す。また図 - 3 に、構造断面図を示す。

当ミキサは、円筒形のミキサ本体中を数枚の攪拌翼(羽根種変更および着脱可能)を有した主軸が回転することによる材料の「浮遊拡散混合」と高速回転チョッパーによる「高速せん断分散」の独立した二つの機能を兼ね揃えており、混合から造粒まで幅広い用途への利用が可能となっている。

造粒にあたっては、主軸回転により浮遊拡散した粉体に、高速で回転しているチョッパー上に水を投入すること

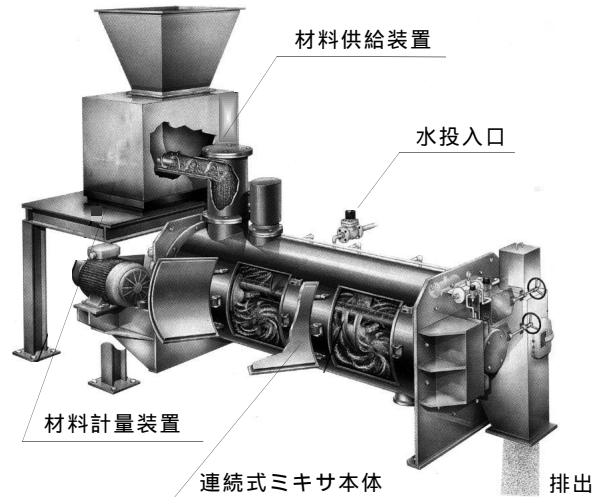


図 - 2 連続式ミキサ模式図

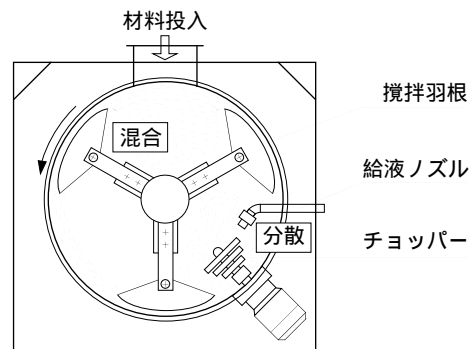


図 - 3 構造断面図

とで分散・均一加水し、それらがお互いに接触することにより、まず造粒物の核が形成される。次に形成された核が更に粉体を取り込みながら大きく成長していく。最後に、成長した造粒物は円筒ドラム内で転動しながら次第に締固められミキサ端部より排出される仕組みとなっている。

2.3 石炭灰の造粒

石炭灰造粒物とは、基本的に、原材料である石炭灰粉に固結材および水を攪拌混合することにより、直径5～20mm程度の球状体を作製し、排水材、盛土材などの土木材料として有効利用しようとするものである。

しかしながら前項にも示したように、石炭灰は微細な砂というコンシステンシー特性を有しており、保水性がないうえ水分離を非常に起こしやすい。すなわち石炭灰に、ミキサ混合等のエネルギーを与えると、灰の粒子間から結合に必要な水分が逃げ出す状態となるために、造粒が非常に困難である。そこで、石炭灰粒子の結合を促進し造粒を容易に行うためには、何らかのバインダ(つなぎ材)の存在が必要である。

通常、造粒物のバインダとしては、コンクリート製造時等に利用する増粘剤が一般的で効果も高いが、これらは非常に高価である。また固化材(例えば、普通ポルトランドセメント)もバインダとしての機能を有しているが、多量の添加が必要となる。

そこで、今回開発した技術においては、保水性を有した材料としてベントナイト等の粘土分を造粒物のバインダとして微量添加することで、ミキサ混合時の造粒に必要な水分確保を行っている。このことにより、図-4に示すように保水粘土成分が核となって石炭灰粒子およびセメントが結合し、連続式ミキサによる石炭灰の固化造粒を可能としている。

材料投入(石炭灰, セメント, ベントナイト, 水)

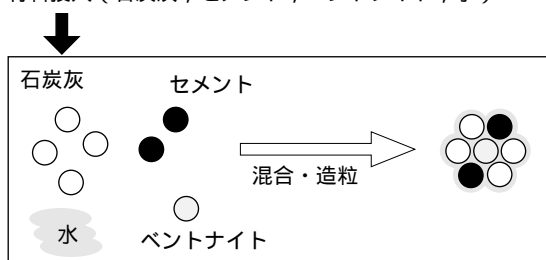


図-4 造粒過程のイメージ図

3. 石炭灰の造粒実験

3.1 造粒機の仕様

連続式ミキサでの石炭灰造粒技術を確立し、さらにはより安価な造粒物作製のための最適配合の決定を目的に、

小型の実験装置を製作し、造粒実験を実施した。

図-5に、造粒実験のために新規に製作した連続式ミキサの概要を示す。実験機は、連続式ミキサ本体、粉体材料供給装置、液体供給装置およびそれらの投入量を調整する制御装置から成る。当実験機においては、粉体材料の投入は各材料ホッパー底部に取り付けられた定量切出装置で体積管理しながら連続投入できる仕組みとなっており、また水は小型の定量ポンプで制御しながら注水

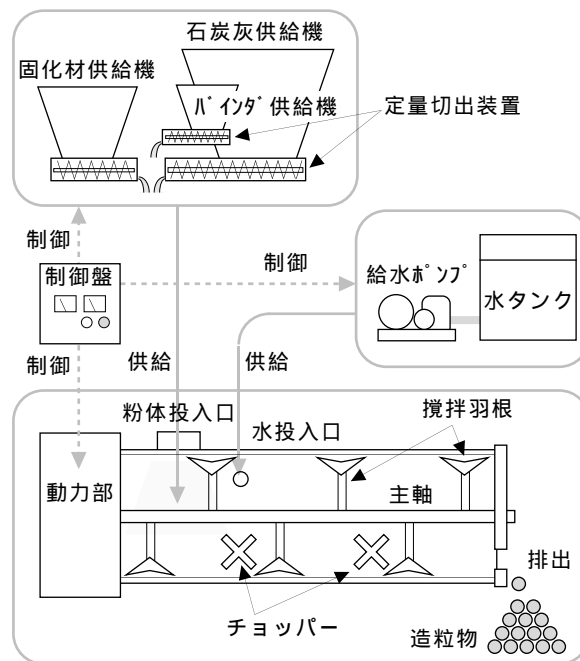


図-5 実験機の概要

表-3 連続式ミキサの仕様

項目	仕様	
ミキサ名称	スキ型シヨベル羽根式高速混合機	
形式	WA-150型(本体容量160リットル)	
最大処理量	450リットル/hr(滞留時間10分)	
標準回転数	主軸	80 rpm (7.5kw × 1)
	チョッパー	1,500 rpm (5.5kw × 2)
混合羽根仕様	主軸(9ヶ所)	フラット, シヨベル羽根
	チョッパー	フラット型, ナイフ型
石炭灰供給機	151～755リットル/hr, ホッパ: 100リットル	
固化材供給機	23～115リットル/hr, ホッパ: 40リットル	
バインダ供給機	7～35リットル/hr, ホッパ: 10リットル	
水供給ポンプ	150リットル/hr, タンク: 50リットル	
架台	SS400	
主要寸法		
	A = 406 mm B = 1,300 mm C = 680 mm D = 2,030 mm E = 550 mm	

することにより、ミキサ内の材料の含水比を0.1%の単位で調整することが可能となっている。また、材料供給のスピードを変化させることにより、ミキサ内での材料の滞留時間を調節することが可能である。

表 - 3 に実験機の仕様を示す。なお、これらの仕様は、事前のバッチ式ミキサでの実験結果を基に決定したものである。

実験機は、共同研究会社である中国高圧コンクリート工業(株)内に設置しており、そこで造粒した供試体を当社技術研究所に持ち帰り、物理・力学試験を実施した。

3.2 実験方法および目的

造粒実験は、図 - 6 に示すフローに従って実施した。各実験の主な目的は以下のようである。

造粒手法の確立（ハード）

造粒原材料を一定とし、造粒機のハードに関する各パラメータ変化による造粒物の性状の変化を確認する。最も良い結果の得られた造粒手法を最適ハード設定とし、以降、同手法により実験を継続する。

コストダウンのための配合検討（ソフト）

コストダウンを目的とし、最も安価でかつSCP材としての機能を有する造粒物のための材料および配合を検討する。

表 - 4 造粒物についての試験一覧

試験名	仕様	備考
【物理試験】		
土粒子密度試験	JGS T 111	
含水比試験	JGS T 121	
単位体積重量試験	JGS T 111	
粒度試験	JIS A 1204	
締固め試験	JGS T 711	3締固めエネルギー
スレーキング試験	JHS 110	材齢28日試料につき
吸水率試験	JHS 110	
透水試験	JGS T 311	3I礼 ⁺ - , 長期材令
【強度試験】		
圧潰試験	JIS Z 8841	初期 ~ 長期材令
三軸圧縮試験	JGS T 531	CD試験, 3I礼 ⁺ -
【溶出試験】		
土壌汚染に係る項目	環告第46号	材齢28日試料につき
ホウ素	JIS K 0102	

SCP材料への適用性評価

SCP材料としての適用性の評価は、表 - 4 に示す各種室内試験により判定する。評価の判定基準としては、既に現場での施工実績のある石炭灰造粒物の物理・力学特性値（例えば、文献2）などを基準とし、各項目において目標値を満足する造粒物の作製を目指す。

現段階においては、造粒手法のハード面はほぼ確立されており、現在も更なるコストダウンおよび品質の向上を目指して造粒実験を継続中である。またこれまでの実験結果より、ある一定の配合にて作製した石炭灰造粒物については、SCP代替材料として利用できる目途がたっている。

現段階においては、造粒手法のハード面はほぼ確立されており、現在も更なるコストダウンおよび品質の向上を目指して造粒実験を継続中である。またこれまでの実験結果より、ある一定の配合にて作製した石炭灰造粒物については、SCP代替材料として利用できる目途がたっている。

4. 石炭灰造粒物の特性

4.1 基本配合

石炭灰造粒物の基本的な主材料は、石炭灰、普通ポルトランドセメント（固化材）、ペントナイト（保水材）および水である。造粒における一般的な配合を表 - 5 に示す。同配合は、造粒機のハード面の調整を行う際の固定配合、また各材料を変化させる場合の基礎となる配合であり、今後「基本配合」と称する。

写真 - 2 に、連続式ミキサで作製した基本配合時の石

表 - 5 石炭灰造粒物の基本配合

石炭灰	固化材	保水材	水
新小野田灰 87%	普通ポルトランド 10%	中国ペントナイト 3%	水道水 20 ~ 24% ^{*)}

すべて重量比, * は粉体総重量に対する比

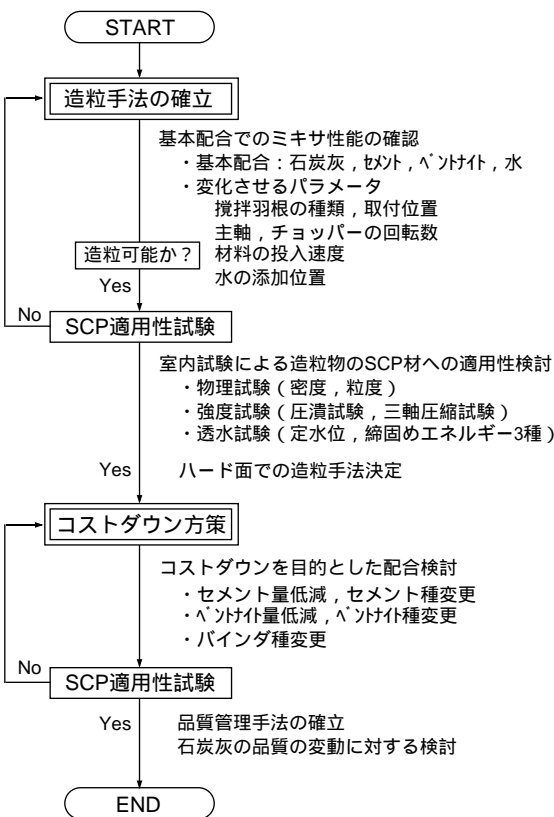


図 - 6 実験フロー



写真 - 2 石灰灰造粒物 (基本配合時)

表 - 6 主要実験ケース

確認内容	配合 (重量%)				備考
	石灰灰	セメント	ペントナイト	水	
含水比変化	87.0	10.0	3.0	23.5	基本配合
	"	"	"	23.7	
	"	"	"	23.8	
	"	"	"	23.9	
ペントナイト量変化	88.0	10.0	2.0	24.2	水は造粒可能な最低量
	89.0	"	1.0	24.6	
	90.0	"	0.0	25.0	
セメント量変化	77.0	20.0	3.0	24.0	
	82.0	15.0	"	"	
	92.0	5.0	"	"	
その他	灰種, ペントナイト種変更 セメント種変更, 時間当たりの材料投入量 主軸羽根種, 水注入位置のハード変更 等				

炭灰造粒物の状況を示す。造粒物はほぼ球状であり、直径5～15mmの範囲で均等に分布している。

4.2 造粒に影響を与えるパラメータ

基本配合を基に各種パラメータを種々変化させ、造粒実験を行った。主要な実験ケースを、表 - 6 にまとめて示す。

4.3 水分量の影響

造粒実験は、まず粉体材料を一定量ずつ投入し、そこに水分量を徐々に増加しながら注入していく。最初粉体であった材料は、数分後には0.5～1.0mmの核が肉眼でも認められるようになり、さらに水分量を増加することにより、徐々に粒径が大きくなり直径5～20mmの球状体へと変化していく。更に水分量を増加させると造粒物の表面に水が浮き始め、粒が互いに付着するようになる。このように、表面に水が浮き始める時の水分量を、造粒可能な最高含水比とする。この状態から今度は水分量を低下させていくと、再度良好な造粒物が得られるようになり、更に低下させると粒径が徐々に小さくなり、最終

的に粉体に戻る。このように、水分が不足し造粒物が小さくなり始める時の水分量を造粒可能な最低含水比とする。

図 - 7 に、造粒時の含水比と圧潰強度 (材齢28日) との関係を示す。ここで、圧潰強度とは球状体の力学的特性を評価するための一指標であり、JIS Z 8841 に規定される試験方法で求めたものである (写真 - 3 参照)。ただしこの方法によると、供試体が球状であり加圧板との接触面が点となるため、強度の測定誤差が大きくなりがちである。そこで今回の一連の試験においては、供試体数を直径のほぼ等しい (1cm 程度) 5個とし、結果の最大値、最小値を除いた3個の平均強度を圧潰強度とした。また圧潰強度と一軸圧縮強さとの間には、圧潰強度 (1/4～1/5) 一軸圧縮強さの関係がある。

図 - 7 をみると、多少ばらつきはあるものの造粒時水分量が小さいほど圧潰強度が大きくなる傾向が現れている。

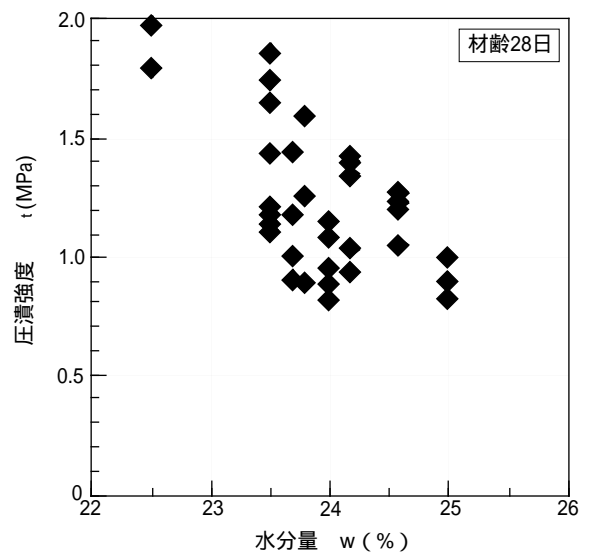


図 - 7 造粒時含水比と圧潰強度



写真 - 3 造粒物の圧潰試験

る。よって同一配合である場合、極力水分の少ない状態で造粒する必要があることがわかる。

4.4 ベントナイトの影響

図-8に、ベントナイトの添加量と造粒可能な最低含水比および造粒物の圧潰強度(材齢28日)の関係を示す。ベントナイトの添加量が多くなるほど造粒可能な含水比が低下し、それに伴い圧潰強度が増加している。

また図中には示していないが、造粒可能な含水比(最高~最低含水比の範囲)は、ベントナイト3.0%添加の場合1.0%程度の範囲を有するが、添加量の減少とともに徐々に範囲が狭くなり、無添加の場合は0.2%程度と造粒が非常に困難となってくる。これは、ベントナイトの添加量を増やすほど、造粒可能な含水比範囲が広くなり、造粒物の品質が安定しやすくなることを示している。しかしながら、いずれにしても石炭灰の造粒には±1.0%と

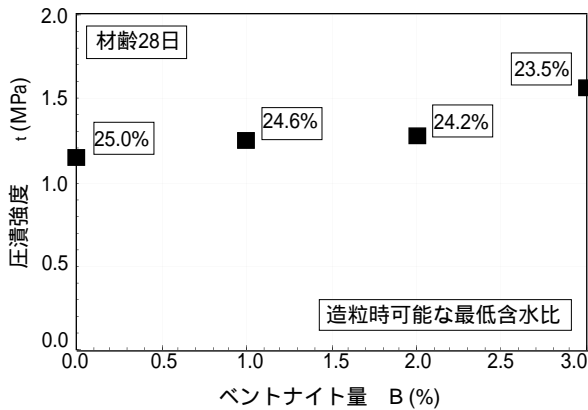


図-8 造粒時のベントナイトの影響

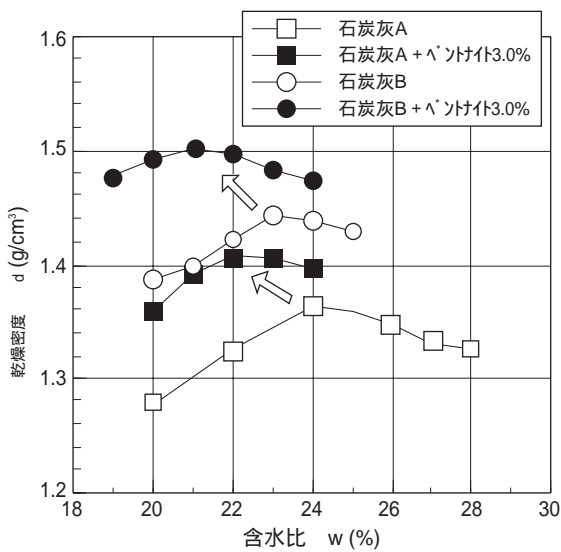


図-9 ベントナイトを添加した石炭灰の締固め試験

いった微妙な水分量の調整が必要であることがわかる。

図-9に、別の実施したベントナイトを添加した石炭灰の締固め試験の結果を示す。ベントナイト3.0%の添加により最適含水比が低下し、乾燥密度が増加している。ベントナイト添加試料においては、この密度増加により造粒物の強度が増加するものと考えられ、今回採用したバインダとしてのベントナイトが、石炭灰の造粒の一助として十分に機能していることがわかる。

なお図-8に示す結果は石炭灰A種によるものであり、その時の造粒時含水比が23.5%であることから、図-9での最適含水比22~23%と比較してほぼ最大乾燥密度に近い状態で造粒ができていることがわかる。

4.5 セメント量

図-10にセメント量と圧潰強度の関係を示す。当然のことながら、セメント量を増やすほど圧潰強度は増加する。ただし、セメント量の増加はすなわち造粒コストの増加につながるため、極力セメント量を抑えて強度を増加する工夫が必要である。またセメントもバインダとしての機能を有しており、セメント量が多くなるほど造粒可能な含水比範囲が広くなり、造粒しやすくなる傾向がある。

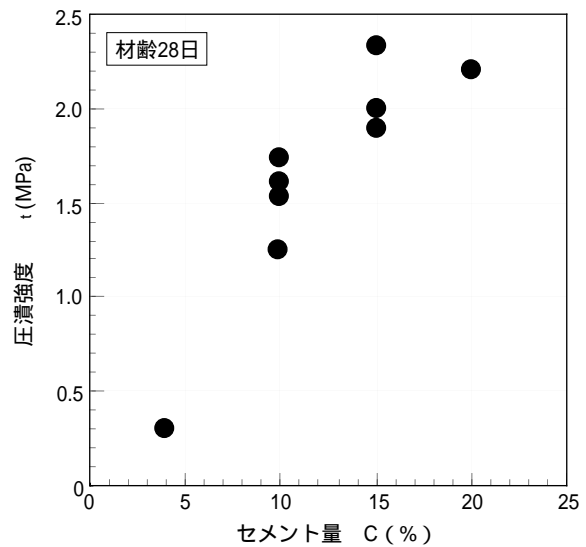


図-10 セメント量と圧潰強度

5. SCP代替材としての適用性

5.1 石炭灰造粒物の物理特性

石炭灰造粒物をSCP代替材料などとして有効利用する際、材料に要求されるのは透水性と強度である。特に透水性については、材料の施工時における破砕による細粒化やスレーキングによる細粒分の溶出など考慮すべき

事項が多い。よってここでは、SCPの造成時に与えられる締固め仕事を"6 × Ec" と仮定し⁹⁾、室内で同様の仕事量で締固めた造粒物について粒度試験、透水試験、三軸圧縮試験 (CD 試験) を実施した。

ここで締固め仕事量 Ec とは、Proctor によって定義されたエネルギーの定義であり、"Standard Proctor" の場合、Ec = 5.6 × 10⁵ J/m³ である。

$$Ec = W_R \cdot H \cdot N_B \cdot N_L / V \dots\dots\dots (1)$$

ここに、

- WR : ランマーの重量 (kg)
- H : ランマーの落下高 (m)
- N_B : 層当たりの突固め回数
- N_L : 層の数
- V : モールドの容積 (m³)

表 - 7 に基本配合時の石炭灰造粒物の物理特性をまとめて示す。

表 - 7 石炭灰造粒物の物理特性 (基本配合時)

試験項目	数 値
造粒物の形状	ほぼ球状
自然含水比 W (%)	11.6
単一粒子の粒子密度 (g/cm ³)	1.811 (湿潤状態)
複数粒の湿潤密度 (g/cm ³)	1.700 (6Ec 突固め)
吸水率 (%)	16.4
スレーキング率 (%)	0.40
平均粒径 (mm)	7.50
圧潰強度 (MPa)	7日 : 1.096 28日 : 1.606
内部摩擦角 φ (deg)	47.6 (6Ec)
透水係数 k (cm/s)	1.34 × 10 ⁻³ (6Ec)

5.2 粒径

図 - 11 に、造粒物の粒度特性および突固めによる粒度変化の様子を示す。

通常時においては、石炭灰造粒物の粒径は5 ~ 20mm程度で土質分類の中礫分にほぼ相当しており、0.075mm以下のシルト分以下は含まれない。この状態では、グラベルコンパクションパイル (GCP) の粒径にあたる。次に、エネルギーを与えて突固めていくと、エネルギーの増加により粒径が細粒化する様子が伺えるが、6Ecの突固めにおいてもシルト分以下の含有率は10%以下であり、SCPの実績粒径範囲外となることはない。またスレーキング率も0.21%と非常に小さく、長期的にも安定しているものと考えられる。

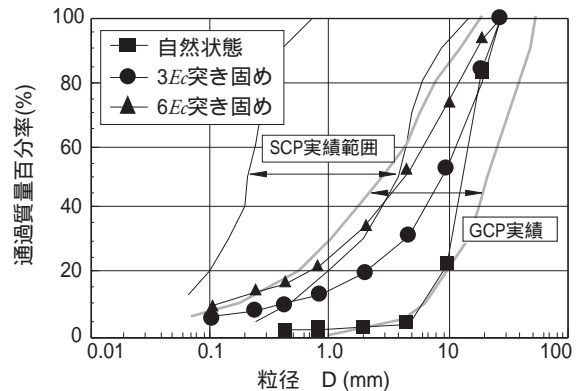


図 - 11 突固めによる粒度の変化

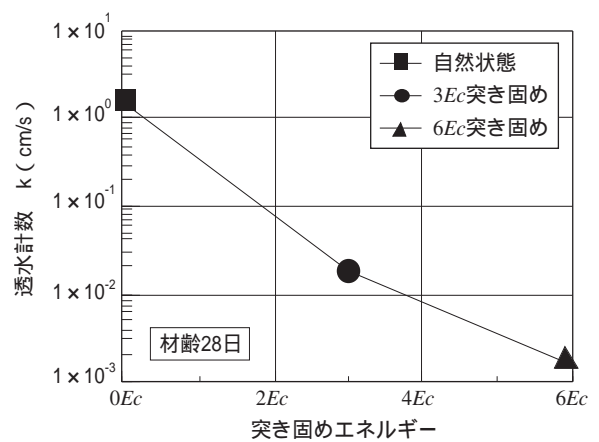


図 - 12 造粒物の透水係数

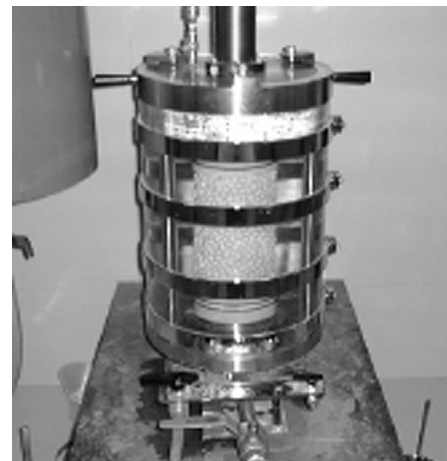


写真 - 4 透水試験装置

5.3 透水性

図 - 12 に、透水試験の結果を示す。また写真 - 4 に、透水試験の状況を示す。

突固めなしの時の透水係数は10⁰cm/sのオーダーであるが、エネルギーを与えることにより造粒物は細粒化

し、透水性は次第に低下していく。ただし6Ec突き固め時においても、 10^{-3} cm/sのオーダーの透水係数を有しており、砂と同程度の透水性を確保している。また材料の強度が大きいほど粒子の破碎は小さくなり、それに伴い透水性は大きくなる傾向が確認されている。

5.4 三軸圧縮試験 (CD試験)

図-13に三軸圧縮試験 (CD試験)の結果を示す。三軸圧縮試験は、一度各エネルギーで突き固めた造粒物をモールド内で密度管理しながら再度突き固めた供試体を用いて実施した。

石炭灰造粒物の内部摩擦角 ϕ は40度以上であり、一般的な海砂による砂杭の内部摩擦角38度と比較してかなり大きい⁵⁾。また6Ecの突き固めにより細粒分が増加しても粘着力 c は発揮されておらず、砂と同様に 材であり、砂と同程度以上の力学性状を有しているといえる。

5.5 環境への影響

石炭灰造粒物をSCP代替材料として使用する際、環境への影響、主に汚染物質の海域への流出を防ぐ必要がある。そこで造粒物について環境庁46号告示法による溶出試験を実施した。

表-8に主要汚染物質の計量結果を示す。この結果、石炭灰造粒物からの基準値以上の汚染物質の溶出は認め

られておらず、環境にも悪影響のないことが確認された。

以上の各種実験の結果より、石炭灰造粒物は砂と同程度の透水性、強度を有しており、また環境にも影響のないことから、SCP代替材として十分に適用可能であると考えられる。

6.まとめ

連続式ミキサによる石炭灰の固化造粒技術を開発し、同手法で作製した造粒物のSCP代替材料としての適用に向けて各種実験を行った。得られた主な結果をまとめると次のようである。

造粒手法について

ベントナイトなどの粘土成分をバインダとして微量添加することによる連続式ミキサでの石炭灰の造粒技術を開発した。

石炭灰造粒物の主材料は石炭灰、固化材、バインダおよび水である。

また小型の造粒機を製作して造粒実験を行った結果、同手法にて安定して造粒が可能であることを確認した。

造粒物について

連続式ミキサにて作製した造粒物は、5~20mmのほぼ球状体であり、物理特性、透水性、強度および環境影響に関する各種室内実験結果より、SCP代替材料として十分に適用可能であると考えられる。

現在も、より安価でより品質の高い造粒物の作製を目指し造粒試験を実施継続中であり、今後早い時期に現場での実証試験を実施する予定である。

謝辞

今回の造粒実験は、中国電力(株)土木部および(株)大林組、中国高圧コンクリート工業(株)、不動建設(株)との共同研究の一環として実施したものであり、特に中国電力(株)ならび中国高圧コンクリート工業(株)の皆様には多大な御援助を頂きました。紙面を借りて謝意を表します。

参考文献

- 1) (財)石炭利用総合センター：石炭灰全国実態調査報告書 (平成9年度分) 1999
- 2) 例えば、(財)石炭利用総合センター：石炭灰有効利用シンポジウム講演集、1998
- 3) 朴・小川・軽部：建設残土と石炭灰を用いた流動化処理土の有効利用に関する研究(その1)、第31回地盤工学研究発表会講演集、pp.193~194、1996
- 4) 橋本建次：廃棄物の固形化技術、1982
- 5) 西沢俊幸：石炭灰固化物のSCP工法への適用、第8回石炭利用技術会議講演集、pp.161~171、1998

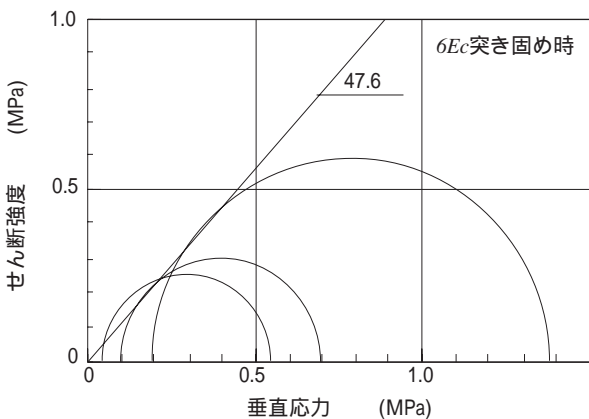


図-13 三軸圧縮試験 (CD試験) 結果

表-8 造粒物の溶出試験結果

項目	計量結果	基準値	単位
カドミウム	0.0002未満	0.01以下	mg/l
総水銀	0.0005未満	0.0005以下	mg/l
アルキル水銀	不検出	不検出	mg/l
鉛	0.002未満	0.01以下	mg/l
六価クロム	0.027	0.05以下	mg/l
砒素	0.001未満	0.01以下	mg/l
セレン	0.001未満	0.01以下	mg/l
PCB	不検出	不検出	mg/l
ホウ素	0.04	(0.2)	mg/l