

# 石炭灰のコンシステンシーの評価と その応用に関する実験的検討

末次大輔<sup>1</sup>・宮田喜壽<sup>2</sup>・木暮敬二<sup>3</sup>・落合英俊<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 正会員 修(工) 防衛大学校 助手 システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686 横須賀市走水1-10-20)

<sup>2</sup> 正会員 博(工) 防衛大学校 講師 システム工学群建設環境工学科 (同上)

<sup>3</sup> フェロー会員 工博 防衛大学校 理工学研究科 教務主事 兼同上 教授 (同上)

<sup>4</sup> フェロー会員 工博 九州大学大学院 教授 工学研究院建設デザイン部門

(〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

石炭灰のコンシステンシーの評価法と、その力学特性の推定への適用性について、室内試験を実施して検討した。混合水量の変化に伴う石炭灰の状態を分類し、コンシステンシーの評価法をセラミックス工学やコンクリート工学の考え方をもとに確立した。フォールコーン試験でそれらを簡便に評価できることを明らかにした。水中落下法で作製した供試体の初期間隙比と圧縮指数を調べ、それらと本研究で提案するコンシステンシーに基づく指標との間に高い相関があることを明らかにした。本論文で提案する石炭灰のコンシステンシーの評価法は、石炭灰を埋立材料として用いる場合に有益と考えられる。

**Key Words** : coal ash, consistency, fall cone test, consolidation test, compressibility

## 1. はじめに

我が国では、石炭火力発電などにより年間約 850 万トンの石炭灰が排出されている。そのうち、約 80% が主にセメント原料あるいはコンクリート混和材として有効利用され、残り 20% が産業廃棄物として埋立処分されている<sup>1)</sup>。石炭灰は「資源有効利用促進法」において有効利用を促進すべき産業副産物の一つに指定され、有効利用の拡大が求められている<sup>2)</sup>。また、石炭灰の排出量は今後も現在のレベルで推移するものと予測されている。しかし、石炭灰の有効利用率の増加は伸び悩んでいるとともに、処分場の確保も困難な状況にある。このような状況のもと、石炭灰の有効利用のための技術開発をさらに進める必要がある。

石炭灰を有効にそして大量に活用する方法として海面埋立柱材としての利用があり、いくつかの研究成果を見ることができる。安原ら<sup>3)</sup>は石炭灰の埋立柱材としての力学的性質を室内試験や模型実験で調べ、水流式や乾式で埋め立てられた石炭灰地盤は液状化強度が非常に小さいことを示した。この液状化強度の低いことの解決策として堀内ら<sup>4)</sup>は石炭灰をスラリー化して埋め立てる工法を提案している。

石炭灰を地盤材料として活用する場合の問題点の一つに、手塚ら<sup>5)</sup>が示しているように、排出される石炭灰の性質は、燃焼する石炭の性質および燃焼方法によって大きく変わることが挙げられる。石炭灰の性質を統一的な指標で評価し、それを利用して石炭灰の力学的性質を簡易に推定することができれば、石炭灰の性質に応じた石炭灰埋立工事の合理的な設計や施工を行うことができると考えられる。従来、土質材料の分類や力学的性質を推定する場合、塑性を示す粘性土に対してはコンシステンシー限界に基づく指標が、砂の場合は粒度分布特性や相対密度が用いられる<sup>6), 7)</sup>。石炭灰はシルトに相当するほぼ均一な粒径で構成され、非塑性の材料である。塑性指数や相対密度のような土質材料に用いられる従来の方法を石炭灰に適用することは難しいので、新たな方法を確立する必要がある。

本研究は上記のような観点に基づき、石炭灰のコンシステンシーに着目した石炭灰の性質の統一的な評価とその応用について実験的に検討するものである。本論文では 2. において、炭種の異なる 6 種類の石炭灰を用いた室内試験をもとに、混合水量の多少によって変化する石炭灰の状態を分類し、石炭灰の状態変化を

表-1 使用した石炭灰の物理的性質

試料名	粒子密度	平均粒径	均等係数	粘土分含有率	細粒分含有率	塑性指数
	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	$D_{50}$ ( $\mu$ m)	$U_c$	(%)	(%)	
RS灰	2.155	10	3.79	15.0	98.9	NP
WW灰	2.128	26	1.84	2.5	93.6	
BS灰	2.174	22	2.16	3.6	91.5	
DD灰	2.333	21	4.46	9.5	89.4	
BT灰	2.264	31	1.68	4.2	93.6	
YP灰	2.382	31	1.62	4.5	91.8	

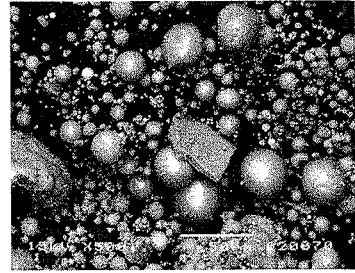


写真-1 SEMによる石炭灰(BT灰)の粒子形状

表-2 使用した石炭灰の化学成分

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	計
	wt(%)						
RS灰	47.6	30.1	7.8	3.0	4.0	4.7	97.2
WW灰	71.8	23.6	0.3	2.1	—	—	97.8
BS灰	61.0	29.4	0.7	1.8	—	4.7	97.6
DD灰	56.7	22.9	3.0	9.2	—	5.4	97.2
BT灰	45.0	26.4	4.6	11.2	4.1	3.7	95.0
YP灰	58.5	14.2	11.4	5.8	3.4	—	93.4

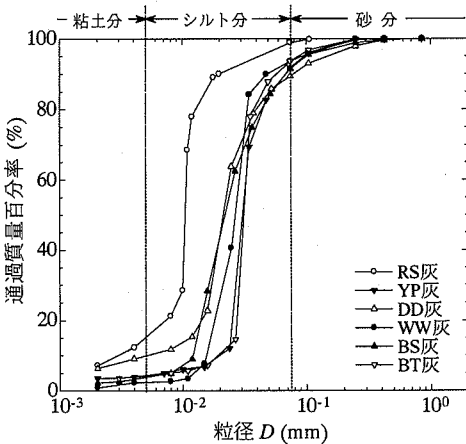


図-1 石炭灰の粒径加積曲線

評価する方法を提示する。3. では、フォールコーン試験を用いて石炭灰のコンシステンシーを簡便に評価する方法を提案する。最後に4. において、水中落下法で作製した供試体の圧密試験結果とコンシステンシーに基づく指標との相関を示し、本論文で提示するコンシステンシーの評価法やそれに基づく指標が、石炭灰の状態の分類や力学的性質の推定に役立つ指標であることを示す。

## 2. 石炭灰のコンシステンシー

### (1) 実験試料

本研究では6種類の石炭灰を使用した。これらの石炭灰は国内の微粉炭燃焼方式の火力発電所において、単一種の石炭を燃焼させたときに発生したフライアッシュである。フライアッシュは水と接触すると、化学反応を起こすものが存在する。本研究で使用した石

炭灰は、排出された直後の状態を保ち、過去に一度も水分と接触していないものである。各石炭灰の物理的性質を表-1に、粒径加積曲線を図-1に示す。石炭灰の粒子密度は2.1~2.4g/cm<sup>3</sup>の値を示し、一般的な土質材料のそれより小さい。石炭灰の粒子形状は写真-1に示すように、ほとんどの粒子が球形という特徴を有する。粒度分布については、均等係数  $U_c$  は約1~5と非常に小さく、粒径の揃った材料である。粒度組成については、細粒分が90%以上を占めており、その大部分はシルト分である。いずれの石炭灰も非塑性であり、日本統一土質分類によると、シルト (ML) に分類される。蛍光X線回折により求めた成分分析結果を表-2に示す。石炭灰の主成分はSiおよびAlであり、これらでおよそ80%を占める。各成分の含有比率は炭種によって異なっている。

### (2) 水を加えたときの石炭灰の状態量の定義

本研究では、水を加えたときの石炭灰の状態を、乾燥状態から石炭灰と水が完全に分離するまで観察した。乾燥状態から石炭灰と水とが完全に分離するまでの状態を模式的に図-2に示す。不飽和状態では、石炭灰粒子、間隙水、空気の3相となる。間隙水が増加すると、飽和状態を経て石炭灰と水が分離する状態になる。この状態において、水相を間隙水と分離水に分けると、石炭灰粒子、間隙水および分離水の3相となる。ここでは、石炭灰と水とが分離する状態を基準に、図-2に示す各相の物理量を用いて、不飽和状態から分離状態までの状態量を定義する。

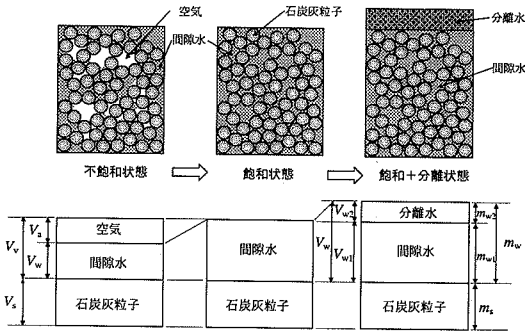


図-2 石灰灰の状態の模式図

石灰灰に加えた水の量を混合水量  $m_w(g)$  とし、 $m_w$  と石灰灰の乾燥質量  $m_s(g)$  の比を混合比  $M_w(\%)$  とすると、 $M_w$  は以下のように表される。

$$M_w = \frac{m_w}{m_s} \times 100 \quad (1)$$

$m_w$  は、間隙水の質量  $m_{w1}(g)$  と分離水の質量  $m_{w2}(g)$  の和で表される。混合水量に対する分離した水の質量の百分率をブリージング率  $B_r(\%)$  とすると、 $B_r$  は以下のように表される。

$$B_r = \frac{m_{w2}}{m_w} \times 100 \quad (2)$$

$m_s$  と  $m_{w1}$  の比を含水比  $w(\%)$  とする。式(1)と式(2)を用いれば、 $w$  は以下のように表される。

$$w = \frac{m_{w1}}{m_s} \times 100 = M_w \left( 1 - \frac{B_r}{100} \right) \quad (3)$$

$B_r=0(\%)$  のとき、すなわち、水が分離しない状態では、 $w$  は  $M_w$  と等しくなる。混合水の体積  $V_w(\text{cm}^3)$  と間隙体積  $V_v(\text{cm}^3)$  との比を間隙水分比  $S_p(\%)$  と定義する。 $S_p$  を飽和度  $S_r$  およびブリージング率  $B_r$  で表すと以下のようになる。

$$S_p = \frac{V_w}{V_v} \times 100 = \frac{S_r}{1 - \frac{B_r}{100}} \quad (4)$$

ここに、飽和度  $S_r$  は以下のように定義する。

$$S_r = \frac{V_{w1}}{V_v} \times 100 \quad (5)$$

式(4)より、間隙水が増加して飽和状態に達するまでは  $B_r=0\%$  であるので、間隙水分比  $S_p$  は飽和度  $S_r$  と等しくなる。以下ではこれらの状態量を用いて、水を加えたときの石灰灰の状態について検討する。

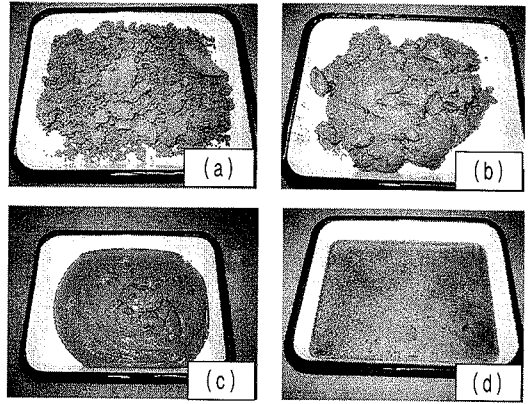


写真-2 混合水量の増加に伴う石灰灰の状態変化

### (3) 石灰灰のコンシステンシーの目視観察

地盤工学では、塑性を示す細粒土の含水量の多少にともなう変形抵抗の程度を指す用語として、しばしばコンシステンシーが用いられる。より一般的にはコンシステンシーは、物体の硬さや流動性の程度を指す用語と定義される<sup>8)</sup>。本研究では、石灰灰の混合水量の変化に従う硬さや流動性の程度を指す用語としてコンシステンシーを用いることとする。本研究では、石灰灰の混合水量の多少による状態を分類することを目的に、次に述べる方法で石灰灰のコンシステンシーを観察した。まず、石灰灰と所定量の水とを混合する。このとき、石灰灰と水を均一に混合させるため、石灰灰に所定量の水を2回に分けて加え、ミキサーを用いて攪拌する。次に、混合比測定用の少量の試料を採取した後、試料をバットに移し、その時の石灰灰の状態を観察する。上述の操作を、乾燥状態から石灰灰と水との分離が卓越する状態まで、混合比にして2%刻みで実施する。乾燥状態の石灰灰に水を加えていったときの状態の変化を写真-2(a)~(d)に示す。乾燥したパウダー状の石灰灰に水を加えていくと、かたまりが目立ってぼそぼそとした状態になる(写真-2(a))。続いて、かたまりが多少確認されるが、流動性を示す状態に変化する(写真-2(b))。さらに水を加えると、かたまりが消失し(写真-2(c))、最終的には、石灰灰と水の分離が顕著になる状態(写真-2(d))に変化する。以上の観察結果を特徴的な現象に着目してまとめると、石灰灰のコンシステンシーは表-3に示すようになる。この考えに基づくと、石灰灰の状態は次の4つに分類することができる。

表-3 観察結果に基づく石炭灰の状態の分類

着目現象	かたまり	有	有	なし	なし
	流動性	なし	有	有	有
水の分離	なし	なし	なし	なし	有
状態の分類	NF	F-1	F-2	F-3	F-3

小 ←————→ 大  
 混合比  $M_w$ (%)

- i) かたまりが存在し流動性を示さない状態 (NF)
- ii) かたまりが存在して流動性を示す状態 (F-1)
- iii) かたまりが存在せず流動性を示す状態 (F-2)
- iv) 流動性を示すが水の分離が顕著な状態 (F-3)

上記の分類において、ii)とiii)の違いの根拠となるかたまりの存在を定量的に評価することは難しいと思われる。そこで、流動性と水との分離性の2つに着目すると、石炭灰の状態は次のように分類することができる。

- I) 団粒状態：流動性を全く示さない状態
- II) 流動状態：流動性を示し水との分離が無い状態
- III) 分離状態：流動性を示し水との分離が顕著な状態

以上の分類における流動状態は、表-3に示したF-1とF-2を合わせたものに対応する。この分類を基にして、一連の目視による観察結果を石炭灰の種類別にまとめると図-3のようになる。なお、状態の境界となる混合比は目視による観察結果の精度を考慮して5%程度の幅で示した。各状態の境界の混合比が石炭灰の種類によって異なることがわかる。団粒状態と流動状態の境界の混合比を流動限界  $M_{wf}$ 、流動状態と分離状態の境界を分離限界  $M_{wg}$ と定義する。次節以降で、それら2つの指標の評価法について述べる。

#### (4) 流動限界の評価法

セラミックス工学の分野において、含水量の多少にしたがって変化する粉体の状態は、固相・気相・液相の連続性に着目して分類される。そこでは、完全に飽和するときが塑性限界、粒子表面の吸着水の連続性が失われるときが液性限界の目安とされる。非塑性の材料の場合は、完全に飽和すると同時に流動し始める<sup>9)</sup>。非塑性材料である石炭灰も同じように、完全に飽和すると流動性を示すと考えられる。本研究では、石炭灰が飽和するときの状態と混合比との関係を調べ、流動限界を間隙水分比と混合比の関係より評価する方法について検討した。

試料の間隙水分比は、内容量が既知の容器に試料を詰め、そのときの密度と混合比を測定すれば算定でき

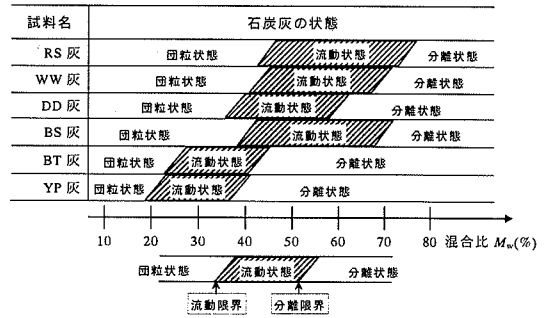


図-3 各石炭灰の状態の分類

る。しかし、試料の混合比は同じでも詰め方によって間隙水分比は変化する。また、型枠等の隅部を有する容器を用いた場合、試料を均一に詰めることは難しい。本研究においては、所定の混合比における間隙水分比を次の方法で測定した。まず、石炭灰と水を混合して攪拌した試料を、半球型のフォルコーン試験用の容器にスプーンを用いて5回に分けて静かに詰め、一回詰める毎に試料を水平に均した。容器から溢れた試料を直ナيفで容器の上端に沿って削り、試料表面を水平にする。次に、容器上面の余分な試料をストレートエッジで削る。容器内に詰めた試料の質量と混合比を測定して、間隙水分比を算定する。

上記の方法で測定した3種類の石炭灰の間隙水分比  $S_p$ と混合比  $M_w$ の関係を図-4(a)~(c)に示す。石炭灰の種類に関わらず、 $S_p$ が100%以下で、 $S_p$ と  $M_w$ の関係は比例関係とみなすことができる。これらの結果において、 $S_p=100\%$ における近似直線の  $M_w$ の値は、RS灰で45%、YP灰で22%、DD灰で36%である。これらの値は図-3に示した観察実験の結果における流動限界とほぼ一致した。その他の3種類の石炭灰についても同様な結果が得られた。以上の結果をもとに、本研究では、石炭灰の流動限界を、半球形の容器に詰めた供試体に対して得られる間隙水分比-混合比の関係において、間隙水分比が100%のときの混合比と定義した。

#### (5) 分離限界の評価法

コンクリート工学の分野において、フレッシュコンクリートにおける水の分離抵抗を、ブリージング試験と呼ばれる試験で評価する場合がある。この方法では、分離水量を測定し、配合した全水量に対する分離水量の割合をブリージング率として計算する<sup>10)</sup>。本研究では、石炭灰の分離限界をブリージング率と混合比の関係より評価する方法について検討した。

分離水量の測定は、次に述べる方法で実施した。まず、所定の含水比で石炭灰と水とを混合し、所定量の

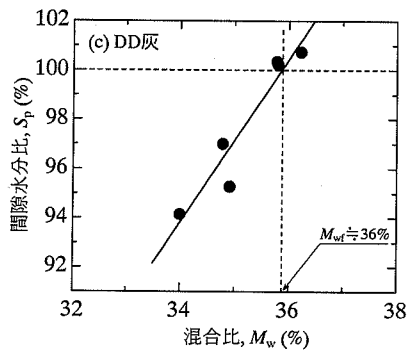
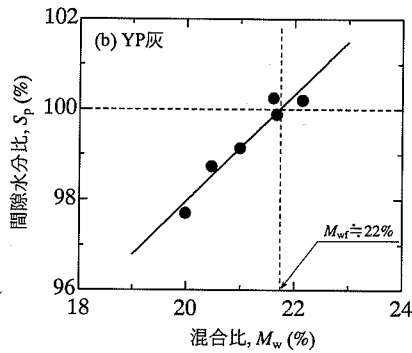
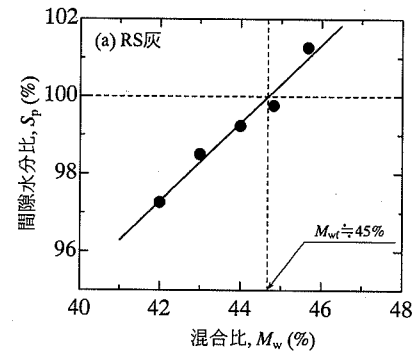


図-4 流動限界の評価方法

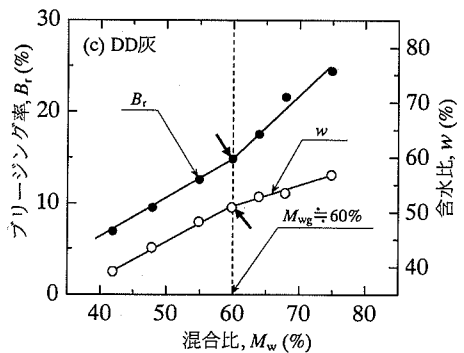
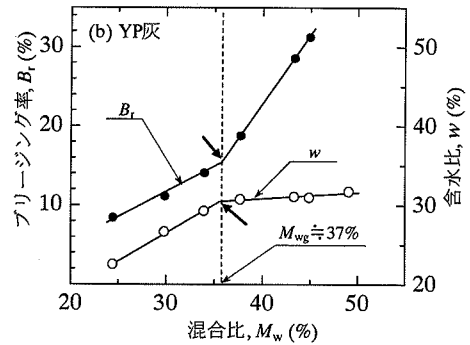
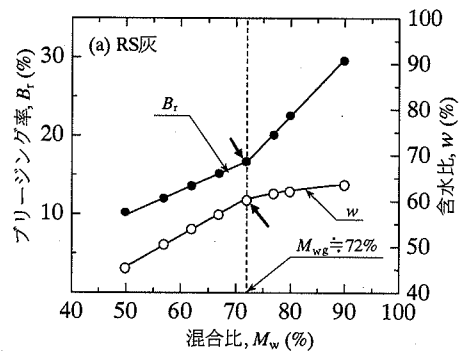


図-5 分離限界の評価方法

試料を500mlのビーカーに流し込む。流し込んだ時から所定の時間間隔で、石炭灰と水との境界面の高さを、その境界面の下降が十分に落ち着くまで測定する。測定終了後、試料の乾燥質量から混合比を算出し、フリージング率を式(2)より算出する。

上記の方法で測定されたフリージング率  $B_f$  と混合比  $M_w$  との関係を図-5(a)~(c)に示す。石炭灰の種類によらず、 $B_f$  は  $M_w$  が大きくなるにつれて高い値となる。 $M_w$  がある値を超えると、 $M_w$  に対する  $B_f$  の増分が大きくなる。 $B_f$  と  $M_w$  との関係は、ある  $M_w$  を境に、それぞれ異なる傾きの2直線で近似することができる。2直線の交点の  $M_w$  の値は、RS灰で72%、YP灰で37%、DD灰で60%である。これらの値は図-3に

示した観察実験の結果における分離限界とほぼ一致した。同図には、含水比  $w$  と混合比  $M_w$  の関係もあわせて示している。 $w$  は  $M_w$  が大きくなるにつれて直線的に大きくなる。 $w$  がある値を超えると、一定値に漸近していく傾向にある。 $w$ - $M_w$  関係が折れ曲がる点は、先に示した  $B_f$ - $M_w$  関係における2直線の交点とほぼ一致する。その他の3種類の石炭灰についても同様な結果が得られた。以上の結果より、2直線が交わる混合比は、これ以上水を加えても含水比が増加せずに、フリージング率のみが増加し始める混合比であるといえる。したがって、石炭灰の分離限界をフリージング率-混合比関係における2直線の交点に相当する混合比  $M_{wg}$  と定義した。

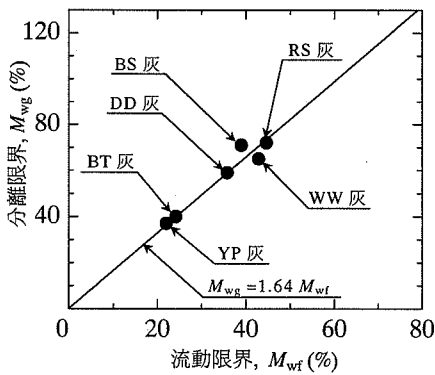


図-6 分離限界と流動限界の関係

### (6) 流動限界と分離限界の関係

今回の実験で得られた分離限界  $M_{wg}$  と流動限界  $M_{wf}$  の関係を図-6に示す。 $M_{wf}$  が小さい石炭灰ほど、 $M_{wg}$  が小さい。両者の関係は比例関係とみなすことができ、次式で近似的に表すことができる。

$$M_{wg} = 1.64M_{wf} \quad (6)$$

上述のような石炭灰の特性をもとにすれば、一方の混合比を評価するだけで、他方を求めることができることになる。次章では、流動限界  $M_{wf}$  をより簡便に測定する方法を示す。

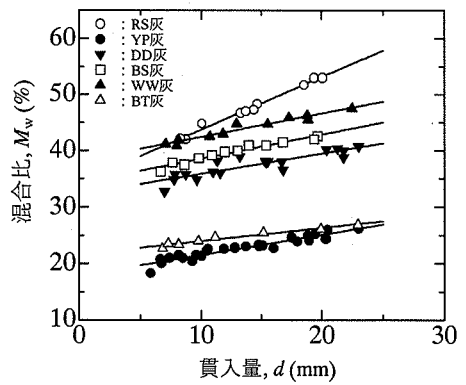


図-7 フォールコーン試験の結果

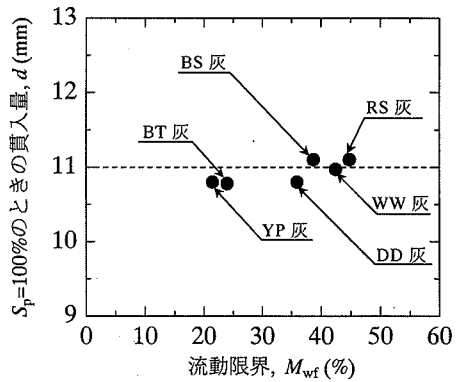


図-8  $S_p=100\%$ のときの貫入量と流動限界

## 3. フォールコーン試験による流動限界の測定法

### (1) 実験概要

2. に示した流動限界  $M_{wf}$  の測定法には、石炭灰の粒子密度が必要になる。石炭灰の粒子密度は  $1.9 \sim 2.4 \text{g/cm}^3$  範囲にあると報告されている<sup>5)</sup>。提案する指標を施工管理などで使用することを考えると、コンシステンシーの評価法はより簡便なものほど望ましい。粘性土の液性限界を測定する方法として、フォールコーン試験がある。この試験の利点は、少ない試料で簡便に液性限界を測定できる点である。本研究では、石炭灰の流動限界  $M_{wf}$  の測定に対するフォールコーン試験の適用性について検討した。

予備実験を地盤工学会基準の方法<sup>10)</sup>で実施した結果、質量が60gのコーンを用いると、流動限界付近の含水比では石炭灰がやわらかすぎて、貫入量を測定できないことが明らかになった。そこで、コーンの寸法が同じで、質量が20gのプラスチック製コーンを新たに作製して試験に用いた。試料は2. で示した方法で作製し、コーンの貫入は基準にしたがって実施した。

なお、付録において、木節粘土を用いて20gのコーンと60gのコーンを用いたときの試験結果を比較している。

### (2) 実験結果

各石炭灰に対するフォールコーン試験の結果を図-7に示す。それぞれの石炭灰ごとに、固有の混合比  $M_w$  と貫入量  $d$  の関係が得られる。また、石炭灰の種類に関わらず、 $M_w$  と  $d$  は直線で近似することができる。今回の供試体の作製方法では、団粒状態での試験結果がばらつくことが懸念された。図-7に示すように、貫入量  $d=10\text{mm}$  以下が団粒状態の結果であるが、ばらつきは小さいと判断できる。今回の方法では、ほぼ均質な供試体が作製されていたと考えられる。

間隙水分比  $S_p=100\%$  となるときのコーンの貫入量  $d$  と流動限界  $M_{wf}$  の関係を図-8に示す。石炭灰の種類によらず、 $S_p=100\%$  で規定した流動限界のときの  $d$  は、概ね  $11\text{mm}$  となる。 $d=11\text{mm}$  になるときの混合比  $M_{w11}$  と  $M_{wf}$  との関係を図-9に示す。 $M_{w11}$  は  $M_{wf}$  とほぼ一致することがわかる。したがって、事前に数種類の混

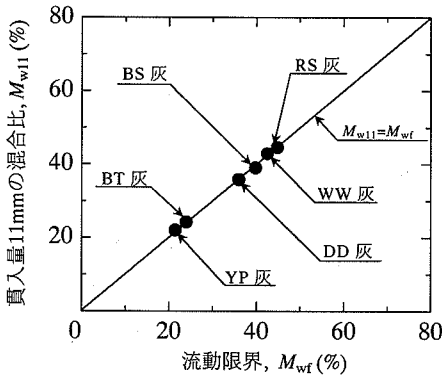


図-9 フォールコーンによる流動限界の評価

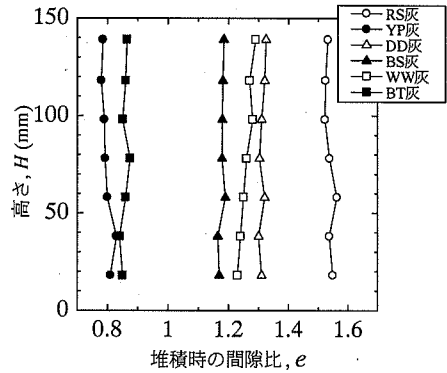


図-10 堆積時の間隙比分布

合比で試料を作製して、混合比-貫入量関係を求め、貫入量が 11mm のときの混合比を求めれば、 $M_{wf}$  を求めることができる。また、 $M_{wf}$  と  $M_{wg}$  には式(6)に示す関係があるので、フォールコーン試験を実施すれば、間接的に  $M_{wg}$  も求めることができる。

#### 4. 石炭灰の圧縮性とコンシステンシーに基づく指標との関係

##### (1) 実験の概要

土のコンシステンシー限界は土の工学的分類に利用されるほか、圧縮指数や非排水強度などの力学的性質を推定するために利用されている。石炭灰についても、コンシステンシーに基づく指標と力学的性質との相関を見出すことができれば、石炭灰を利用した埋立の合理的な設計や施工などに役立つと思われる。本研究では、水中に水流式あるいは乾式で石炭灰を埋め立てる場合を想定して、水中落下法で作製した石炭灰に対して圧密試験を実施し、初期間隙比および圧縮指数とコンシステンシーに基づく指標との関係について考察した。

圧密試験に用いた石炭灰供試体は次のように作製した。内径 $\phi=80\text{mm}$ 、高さ $H=300\text{mm}$ のモールドに水を張っておき、所定量の石炭灰を一定の投入速度でふるいを通してながら投入し沈降堆積させる。石炭灰の投入から 24 時間後、モールド内部の水をモールドの底部より十分に排出させる。沈降堆積後における間隙比の高さ方向の分布を図-10に示す。間隙比の値は若干ばらつくものの、どの高さにおいてもほとんど一様と見なせる。圧密試験に用いる供試体は、石炭灰供試体の底部より、75mm の高さの部分から、カッターリングを用いて直径 $D=60\text{mm}$ 、高さ $H=20\text{mm}$ の寸

表-4 各石炭灰の初期間隙比

試料名	RS 灰	YP 灰	DD 灰	BS 灰	WW 灰	BT 灰
初期間隙比 $e_1$	1.538	0.839	1.308	1.176	1.260	0.875

法に成形した。圧密試験はペロフラムシリンドラーを用いて応力制御で行った。圧密応力は 9.8kPa から応力増加率  $d\alpha_x/\alpha_x=1$  の応力段階で 1254.4kPa まで載荷した。

##### (2) 実験結果と考察

水中落下法で作製した供試体の初期間隙比  $e_1$  を表-4に示す。 $e_1$  の値は石炭灰の種類によって異なり、最も小さいもので 0.839、最も大きいもので 1.538 となる。圧密試験結果の代表的な例として、3種類の石炭灰に対する間隙比  $e$  と圧密応力  $\alpha_x$  との関係を図-11(a)~(c)に示す。水中落下法で作製した石炭灰の  $e$ - $\log \alpha_x$  関係は、一般的な粘性土のそれと類似している。圧密降伏応力以降については、いずれの石炭灰も圧密応力の増加にともなって、間隙比は片対数グラフ上でほぼ直線的に減少する。この応力域における直線の傾き圧縮指数  $C_c$  は、それぞれ異なった値となる。

石炭灰のコンシステンシーに基づいて、以下のような指標を定義する。

$$I_s = M_{wg} - M_{wf} \quad (7)$$

$I_s$  は流動状態を示す混合比の幅を示す。水中落下法で作製した供試体の初期間隙比  $e_1$  と  $I_s$  との関係を図-12に示す。 $I_s$  が大きい石炭灰ほど  $e_1$  が大きくなり、その関係は直線関係となる。圧縮指数  $C_c$  と  $I_s$  の関係を図-13に示す。 $I_s$  が大きいと  $C_c$  も大きくなる。 $I_s$  が大きい石炭灰ほど飽和状態に到達してからの含水比が大きくなるので、堆積した状態での間隙比も大きい。

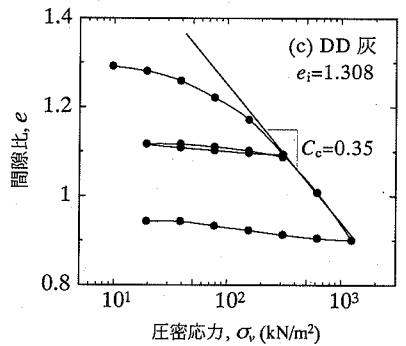
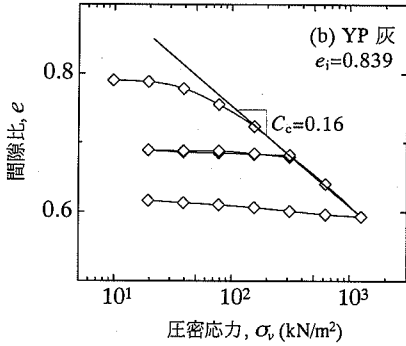
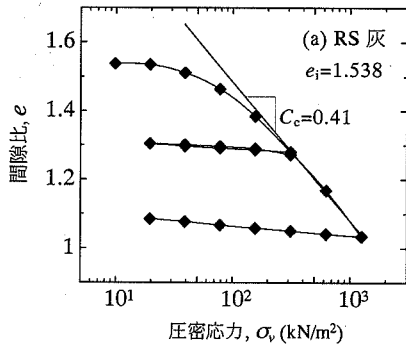


図-11 圧密試験結果

非粘着性の粒状土は、初期間隙比が大きいものほど圧縮性が高い。今回の使用した供試体は、養生期間が短く石炭灰の自硬性の影響は小さいと考えられる。したがって、 $I_s$  が大きな石炭灰ほど圧縮指数が大きくなったと考えられる。

本研究において提案する石炭灰のコンシステンシーに基づく指標は、水中落下法で作製した供試体の初期間隙比および圧縮指数との間に高い相関がある。本研究で提案する石炭灰のコンシステンシーの評価法は、水域における埋立材料として利用される石炭灰の圧縮指数を推定する有用な指標となり得ると考えられる。

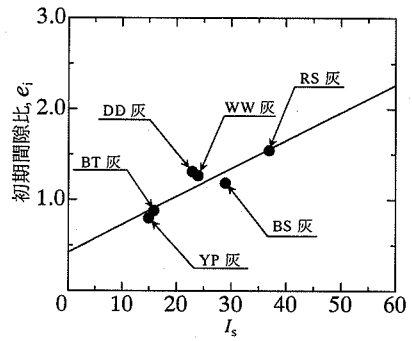


図-12  $I_s$  と初期間隙比の関係

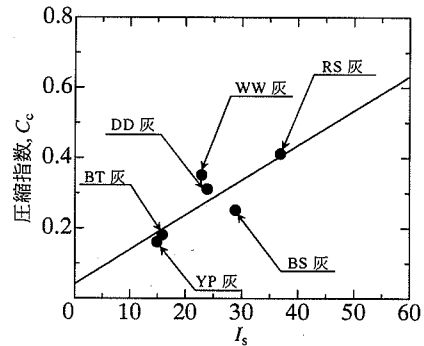


図-13  $I_s$  と圧縮指数の関係

本研究では、微粉炭燃焼による単一種の新生灰を用いてコンシステンシーの評価法を提示した。実際には、本研究で使用したような石炭灰の他に、燃焼方法が異なるものや数種類の石炭を混合して燃焼させたものがある<sup>12)</sup>。水分と接触してすでに自硬性が発現している既成灰のように、石炭灰は保存形態や時間経過に伴い物理的性質や化学的性質が変化する<sup>13), 14)</sup>。また、本研究では水域における埋立材料として使用することを念頭において検討を行っており、締固めた石炭灰とは使用する際の状態が異なる。以上のような条件における本提案法の適用性については今後検討する必要がある。

## 5. まとめ

本研究では、多種多様な石炭灰の力学的性質を簡易に推定する方法を確立するために、石炭灰のコンシステンシーに着目した石炭灰の性質の統一的な評価とその応用について検討した。本論文では、石炭灰のコンシステンシーの定義とその評価法について述べた。そして、圧密試験の結果をもとに、石炭灰のコンシ

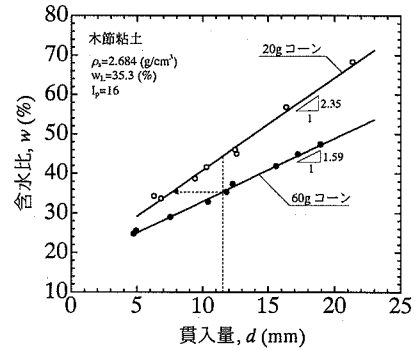


テンシーに基づく指標と圧縮指数との関係を調べた。本研究で得られた主要な知見をまとめると以下のようになる。

- (1) 混合水量の多少によって変化する石炭灰の状態は団粒状態、流動状態、分離状態の3つの状態に分類することができる。
- (2) 団粒状態と流動状態の境界を流動限界と定義し、流動限界を石炭灰が飽和状態に到達したときの混合比として測定する方法を示した。流動状態と分離状態の境界を分離限界と定義し、分離限界を石炭灰と水との分離が顕著に現れはじめるときの混合比として測定する方法を示した。
- (3) 20gのコーンを用いたフォールコーン試験より、コーン貫入量が11mmのときの混合比と流動限界とは、ほぼ1対1の関係にあることが明らかとなった。この結果と、流動限界と分離限界が比例関係にあることを利用することにより、流動限界と分離限界をフォールコーン試験で評価できることを示した。
- (4) 水中落下法で作製した石炭灰の初期間隙比および圧縮指数は、炭種によって異なることが明らかとなった。石炭灰のコンシステンシーに基づく指標と初期間隙比および圧縮指数には高い相関があることを示した。

## 付録

木節粘土 ( $\rho_s=2.684\text{g/cm}^3$ ,  $I_p=16$ ) を用いて、60gのコーンと20gのコーンの結果を比較したものを図A-1に示す。含水比  $w$  と貫入量  $d$  の関係より得られる近似直線の傾きは、20gのコーンの方が大きくなる。60gのコーンを用いた試験では、液性限界  $w_L$  は  $d=11.5\text{mm}$  のときの含水比と定義され、本試験においては  $w_L=35.3\%$  となる。このとき、20gのコーンでは  $d=7.6\text{mm}$  となる。20gのコーンを使用して得られる  $w-d$  関係は、60gのコーンのそれと比較して、近似直線が上方に位置して傾きが大きくなる。



図A-1 木節粘土のフォールコーン試験結果

## 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12年度分），2002。
- 2) 例えば、「資源の有効な利用促進に関する基本方針」，環境省告示1号，2001。
- 3) 安原一哉，兵動正幸，平尾和年：石炭灰の埋立地盤の液化特性，土と基礎，Vol.39, No.2, pp.5-10, 1991。
- 4) Horiuchi, S., Tamaoki, K. and Yasuhara, K.: Coal ash slurry for effective underwater disposal, *Soils and Foundations*, Vol.35, No. 1, pp. 1-10, 1995。
- 5) 手塚眞，小野純夫，前川嗣哉，島正憲，長屋洋司，井上雅人，木下茂樹：電力石炭灰の性状および土質特性 その1：新生灰の性状及び土質特性，第4回石炭利用技術会議講演概要集，pp.72-84, 1994。
- 6) 田中洋行，榊原基生：港湾地域における土の一次性質の統計解析，港湾技研資料，No. 719, pp. 11-13, 1991。
- 7) Tatsuoka, F., Muramatsu, M. and Sasaki, T.: Cyclic undrained stress-strain behavior of dense sands by torsional simple shear tests, *Soils and Foundations*, Vol. 22, No. 2, pp. 55-70, 1982。
- 8) 土質工学会：土質工学用語辞典，p. 61, 1985。
- 9) 梅屋薫：セラミックス成形工学におけるレオロジーの役割，日本レオロジー学会誌，Vol.13, No.4, pp.145-166, 1985。
- 10) 岡田清，明石外世樹，小柳治：新編土木材料学，国民科学社，pp.144-154, 1994。
- 11) 地盤工学会編：土質試験の方法と解説，pp.93-106, 2000。
- 12) 環境技術協会：石炭灰ハンドブック，1995。
- 13) 水上純一，菊池喜昭，小椋卓実：水浸養生した固化処理石炭灰の工学的性質，第3回環境地盤工学シンポジウム発表論文集，pp.107-110, 1999。
- 14) 桜井敏夫，佐藤健，橋本匡史，福永誠：フライアッシュのポゾラン反応性，セメント技術年報，Vol. 21, pp. 101-109, 1967。

(2003.5.22 受付)

# EXPERIMENTAL EXAMINATION ON EVALUATION AND ITS APPLICATION OF CONSISTENCY FOR COAL ASH

Daisuke SUETSUGU, Yoshihisa MIYATA, Keiji KOGURE

and Hidetoshi OCHIAI

This paper concerns geotechnical utilization of coal ash. First, definition and evaluation method of consistency for coal ash is proposed based on laboratory investigation. Condition of coal ash depending on amount of mixed water is classified into three categories and the two boundaries are defined based on knowledge of ceramics engineering and concrete engineering. These boundaries are evaluated easily by conducting the fall cone test with 20g cone. Its application for estimating mechanical properties is also examined. Initial void ratio and compression index of coal ash specimens prepared by water sediment method correlate closely with index consisted with the proposed consistency limits. Proposed evaluation method of consistency and the application for estimating of mechanical property can be useful in the case of using coal ash as reclamation material.