

アクアソイル工法に関する研究（その4）

——石炭灰を利用したアクアソイルの性状——

喜田大三 久保 博
漆原知則

Studies on Aqua Soil Method (Part 4)

——Properties of Aqua Soil Containing Coal Ash——

Daizo Kita Hiroshi Kubo
Kazunori Urushibara

Abstract

The properties of Aqua Soil containing coal ash were tested. Coal ash samples were obtained from four thermal power stations. Artificial sea water was used for mixing water.

(1) The fluidities of Aqua Soils containing coal ash and cement, the latter in a range of 25 to 100 kg/m³, were increased with higher water content. The water content required for a given fluidity differed considerably according to coal ash.

(2) The solidified strengths (q_u) of the abovementioned Aqua Soils controlled at 19 to 22 cm in terms of small slump flow had relationships with coal ash (A), cement (C), and water (W) of $q_u = \alpha + (\beta_1 + \beta_2 \cdot W/A)C/W$ and with age t (day) of $q_u = 10^{\alpha+bt}$.

(3) The resistance to segregation on placing in water decreased with fluidity, but was increased by addition of a segregation-controlling admixture.

概 要

アクアソイル工法において水中に打設する混合処理物（アクアソイルという）に石炭灰を用いた場合の性状を調べた。4箇所の異なる火力発電所の石炭灰を用い、混練水として人工海水を用いた。

(1) 石炭灰を用い、セメントを25～100 kg/m³添加したアクアソイルの流動性は、1 m³当りの水量とともに増大した。そして、一定の流動性を得るのに必要な水量は、石炭灰によってかなり異なった。

(2) 流動性を小型スランプフローで19～22 cmに調整した上記アクアソイルの固化強度 (q_u) は、石炭灰 (A)、セメント (C)、水 (W) の配合比との間に、 $q_u = \alpha + (\beta_1 + \beta_2 \cdot W/A)C/W$ 、また材令 t (日) との間に、 $q_u = 10^{\alpha+bt}$ の関係が認められた。

(3) 水中分離抵抗性は、流動性を増大させるのに伴って低下し、粘結剤の添加によって著しく改善された。

1. まえがき

アクアソイル工法において、水中に打設する混合処理物（アクアソイルともいう）は、土砂系材料、セメント、水、及び必要に応じて添加する粘結剤などからなる。ここで、土砂系材料としては、砂質土や粘性土だけでなく、現場で入手できる各種の細粒材を利用可能である¹⁾。

一方、石炭灰は、わが国で石炭火力発電所などから約400万トン/年発生し、その約半分が有効利用されずに埋立てなどによって処分されている。工事現場が石炭灰の発生地に近い場合、石炭灰を安価で大量に入手することが可能になる。そして、石炭灰は、自硬性を有し、また

ポゾラン反応性にも富んでいる²⁾。

筆者らは、石炭灰がアクアソイルの土砂系材料として流動性、固化強度などにおいて適していることを既に確認している。この報告では、土砂系材料として石炭灰を用いたアクアソイルの流動特性、固化特性、水中分離抵抗性について述べる。

2. 供試材料

2.1. 石炭灰

表1の4種類の石炭灰を用いた。それぞれ異なる火力発電所から発生したもので、いずれもフライアッシュまたはフライアッシュを主体とする灰である。T、J及びI

灰	含水比 (%)	比重	主な化学成分 (%)						計
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	
T	22	2.28	54.1	26.4	4.0	6.7	1.5	0.3	93.0
J	0	2.17	58.2	25.6	3.6	6.5	1.0	0.4	95.3
I	0	2.23	50.6	30.2	5.6	9.9	1.9	0.4	98.6
S	0	2.29	64.4	26.2	3.7	2.7	0.5	0.3	97.8

表一 石炭灰の性状

は、国内炭あるいは国内炭と海外炭を混合して燃焼させた灰であり、Sは海外炭を燃焼させた灰である。また、Tは湿潤状態にして排出された灰であり、その他は乾燥状態のまま排出された灰である。

石炭灰の比重は、2.2~2.3であった。また、石炭灰は、SiO₂とAl₂O₃を主体とし、SiO₂-Al₂O₃-CaO+Fe₂O₃の3成分の比率は、ベントナイトなどの粘土に類似していた。石炭灰の粒度は、図一1のように、最大粒径約0.5mm、平均粒径(D₅₀)12~35μmであった。

2.2. セメント、混練水、粘結剤

セメントとして普通ポルトランドセメント、また混練水として人工海水(塩分濃度3.4%)を用いた。粘結剤としては、セルロース系エーテルを主成分とするものを用いた。

3. 実験方法

3.1. 流動特性試験

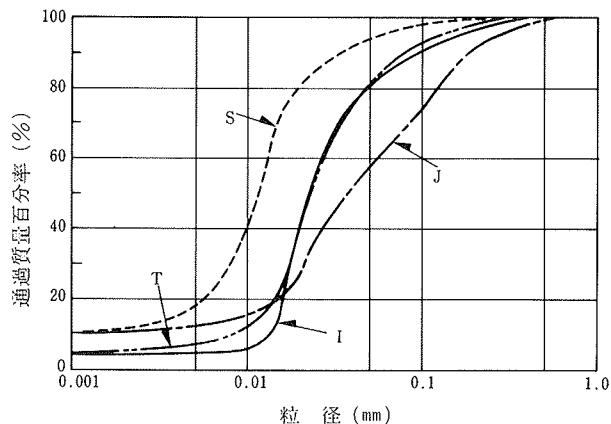
「石炭灰+人工海水」及び「石炭灰+セメント+人工海水(以下、水という)」を各種の比率で混練し、直後の流動性を2つの方法によって測定した。その1つは、Pロート(1725cm³)による流下時間T_fを測定する方法であった。他の1つは、上端径5cm、下端径10cm、高さ15cmのスランブ試験用コーンに試料を詰め、コーンを引抜いた後に円状に広がった試料の直径を測定する方法であった。このコーンは、JISのコンクリート試験用のコーンの1/2の寸法である。この試験による直径を、ここでは小型スランブフローF_s'という。

なお、F_s'は、JISによるコーンで同様の試験を行なって測定した直径(ここでは標準スランブフローF_sという)との間に図一2のような関係を示した。

3.2. 固化試験

ホバート型ミキサーを用いて、石炭灰とセメントを2分間混合し、これに水を加えてさらに3分間混合してアクアソイルを作製した。これをφ5cm×h10cmのモールドに詰め、20°C水槽に所定期間養生した後、一軸圧縮強度などを測定した。

また、混練したアクアソイルのブリージング率を、土木学会による「注入モルタルのブリージング率及び膨脹率試験方法」によって測定した。



図一 石炭灰の粒径加積曲線

3.3. 水中分離抵抗性試験

3.2.と同様にしてアクアソイル(一部、粘結剤添加)を作製し、アクアソイル500gをあらかじめ水道水800cm³を入れておいた1lビーカーに、10等分にして水面から10~20秒間で投入した。その直後のビーカー内の中間深さのpH及びSS(浮遊懸濁物濃度)を測定した。

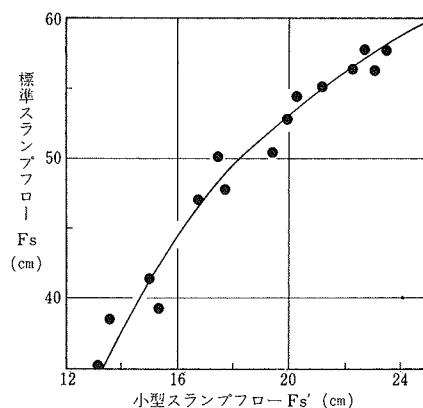
4. 結果と考察

4.1. 流動特性

この工法では、通常、アクアソイルをコンクリートポンプによって圧送・打設し、水底ではセルフレベリング性によって緩やかなこう配で流動させる。従って、アクアソイルの流動性は、非常に重要である。

「石炭灰+水」及び「石炭灰+セメント+水」の水量と流動性の関係を図一3に示す。ここで、水量は、練上り1m³中に含まれる水量(l/m³)で表わした。そして、参考のために、4種の石炭灰の平均比重(2.24)で計算した水と固形分の比の百分率、すなわち含水比も併記した。

図一3のように、水量の増大とともに、小型スランブフローF_s'は増大し、また流下時間T_fは減少した。そして、各灰ともセメントを混入しない場合と、セメントを



図二 小型スランブフローと標準スランブフローの関係

100kg/m³混入した場合の水量~流動性の関係は類似していた。従って、この程度までのセメント量であれば、セメントが同体積の石炭灰と置換しても、流動性に影響しない

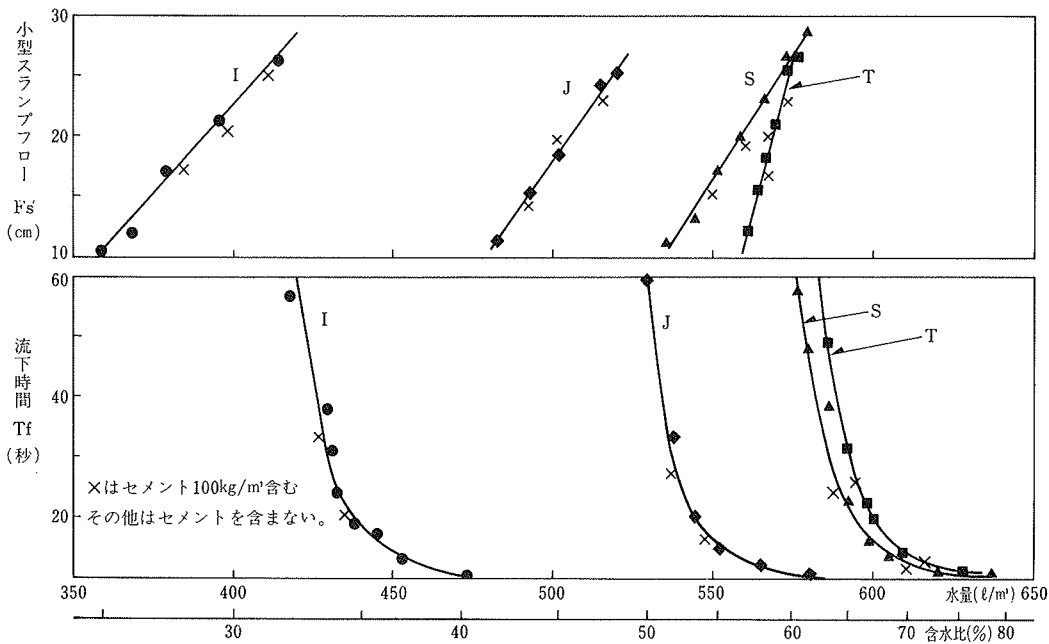


図-3 「石炭水+水」、「石炭灰+セメント+水」の水量と流動性の関係

と考えられる。

また、一定の流動性を得るのに要する水量は、石炭灰によって大きく異なり、 $I < J < S < T$ の順であった。Tが多量の水を必要とする原因の1つに、Tが長時間、湿潤状態におかれ、微細な内部間隙にまで吸水したことが考えられる。

他の3つは、いずれも乾燥状態にあった灰であるが、前述の図-1から明らかなようにSが最も細粒分に富み、次いでJ、Iの順である。そして、Jは粒径加積曲線が緩やかで、粒度分布がよい。これらのことが、水量と流動性の関係に影響したと考えられるが、その他に石炭灰の

に、ブリージング率は、3~5%で、石炭灰や配合の相違によってほとんど変わらなかった。また、固化体の湿潤密度は、約1.5~1.8 g/cm³であり、水量の少ないIが最大であった。

4.2.2. 配合と固化強度の関係 表-2のように、固化強度(ここでは一軸圧縮強度 q_u)は、石炭灰によって異なり、特にI、Jは非常に大きな強度を発現した。最も低強度であったTでも、別途の実験による山砂を用いたアクアソイル(セメント量、スランプフローは同一条件)よりもやや大きな強度を発現した。このように大きな強度を発現した理由として、石炭灰とセメントの反応など

表面の性質の相違などの影響も考えられ、今後さらに調査を要する。

4.2. 固化特性

4.2.1. ブリージング率, 固化体密度

固化試験の配合と結果を表-2に示す。セメント量を25, 50, 100 kg/m³の3レベルとし、石炭灰と水の量は、水中でのセルフレベリング性などを考慮して $F_s' = 19 \sim 22$ cm の範囲に調整した。

表-2に示すよう

灰種	配合 (kg/m ³)			W/A	C/W	小型スランプフロー (cm)	一軸圧縮強度 q_u (kgf/cm ²)				密度 (g/cm ³)	ブリージング率 (%)
	灰 A	セメント C	水 W				7日	14日	28日	91日		
I	1,332	25	399	0.300	0.063	19	9.2	15.5	19.8	20.9	1.75	4
	1,323	50	397	0.300	0.126	20	20.2	30.5	42.5	56.2	1.75	4
	1,313	100	394	0.300	0.254	20	40.0	56.2	79.8	100.9	1.78	3
J	1,054	25	506	0.480	0.049	22	2.6	7.4	8.2	11.8	1.56	4
	1,045	50	502	0.480	0.100	20	4.7	9.2	15.9	21.5	1.55	4
	1,037	100	498	0.480	0.201	21	9.3	18.1	41.9	66.5	1.59	4
S	975	25	566	0.581	0.044	21	1.5	1.8	2.9	3.5	1.55	4
	967	50	561	0.580	0.089	19	2.5	5.0	6.9	10.6	1.56	3
	949	100	551	0.581	0.182	20	8.7	18.0	25.9	38.5	1.59	3
T	956	25	573	0.599	0.044	20	0.6	1.8	2.2	2.4	1.51	5
	948	50	568	0.599	0.088	20	2.2	4.0	6.3	8.0	1.54	4
	940	100	564	0.600	0.177	21	6.1	12.6	18.0	24.6	1.56	4

表-2 固化試験の配合と結果 (q_u は2連の平均値)

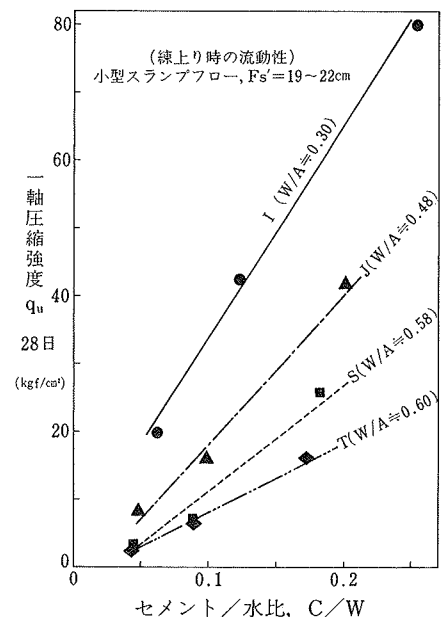


図-4 C/W と q_u 28日の関係

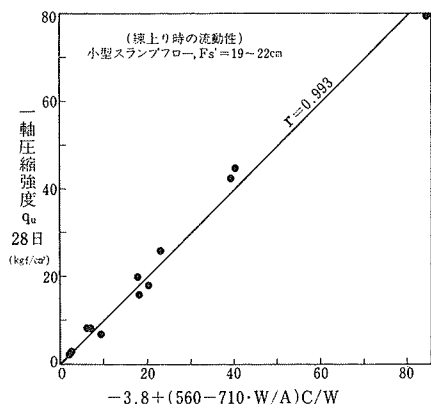


図-5 実験式による値と qu28日の関係例

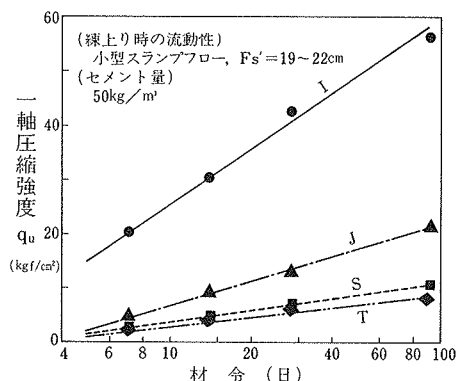


図-6 材令と qu の関係例

が考えられ、それについては4.2.4.に述べる。

つぎに、石炭灰をアクアソイルの材料として利用する際、配合と強度との間にできるだけ凡用性のある関係を見出しておくと便利である。そこで、まずセメント/水比(C/W)とquの関係について調べた。その結果の一例を図-4に示す。個々の石炭灰においては、C/Wとquとの間に直線関係が認められ、コンクリートの場合と同様に(1)式が成立した。

$$qu = \alpha + \beta \cdot C/W \quad \dots\dots\dots(1)$$

α, β : 定数

しかし、石炭灰が異なると、図-4において直線は別々の傾き(β)と切片(α)を示し、特に直線の傾きの差異が著しかった。従って、(1)式では、配合と強度の関係式として十分でないことが判明した。

つぎに、図-4をさらに詳細に検討した結果、直線の傾きが水/石炭灰比(W/A)によって強く影響されていること、すなわち(1)式の β がW/Aの関係する式で表わされることを認めた。そして、(2)式を考案した。

$$qu = \alpha + (\beta_1 + \beta_2 \cdot W/A)C/W \quad \dots\dots\dots(2)$$

α, β_1, β_2 : 定数

(2)式をもとに、4つの石炭灰を包括した関係式、相関係数は、各材令ごとに以下のものであった。

- qu 7日 = $-1.1 + (300 - 455W/A)C/W$
r = 0.988
- qu 14日 = $-0.8 + (410 - 585W/A)C/W$
r = 0.986
- qu 28日 = $-3.8 + (560 - 710W/A)C/W$
r = 0.993
- qu 91日 = $-7.7 + (740 - 880W/A)C/W$
r = 0.981

上式の右辺と左辺の関係の一例として、材令28日の場合を図-5に示す。このように、(2)式は、石炭灰が異なっても、石炭灰を用いたアクアソイルの配合と強度の関係式と

して高い相関性をもつ有用な式であることが示唆された。

4.2.3. 材令と固化強度の関係 表-2に示したように、強度は、材令28日以後も漸増した。材令と強度の関係についていろいろ検討した結果、図-6に一例を示すように、個々の石炭灰において強度は材令の対数とともに直線的に増大することが認められた。すなわち、(3)式が示唆された。

$$qu = 10^{a+bt} \quad \dots\dots\dots(3)$$

t : 材令(日), 但し, $t \leq 91$
 a, b : 定数

4.2.4. 固化体の微視的形態と生成鉱物 石炭灰の走査型電子顕微鏡(SEM)写真の一例を写真-1、また石炭灰を用いたアクアソイル固化体のSEM写真の一例を写真-2に示す。石炭灰は、直径数~100 μ mの表面がほぼ滑らかな球状粒子を主体とし、一部、不定形粒子を含んでいた。そして、写真-2のように、アクアソイル固化体では、石炭灰の表面がスポンジ状及び一部板状の生成物によって被われ、これらが間隙を充てんし、相互に連結して強度増大に寄与したことが推察される。

また、図-7に固化体のX線回折図例を示すように、生成鉱物としてエトリンジャイト及びアルミン酸カルシウム水和物(C₄AH₁₃)が認められ、それぞれ前述のSEM写真のスポンジ状及び板状の生成物の一部であると考えられる。なお、図-7において、石英及びムライトは、元来、石炭灰に含まれていた鉱物である。

4.3. 水中分離抵抗性

アクアソイル工法では、水中打設時の水質汚濁を抑え、造成される固化地盤を均一なものにするために、一般に

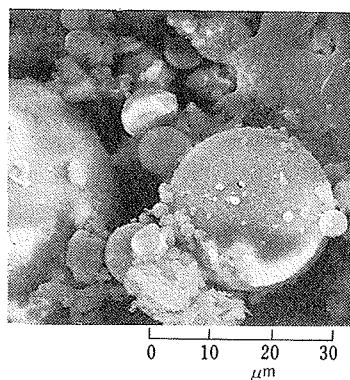


写真-1 JのSEM写真

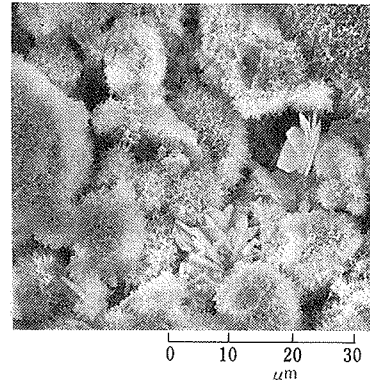


写真-2 セメント固化したJのSEM写真

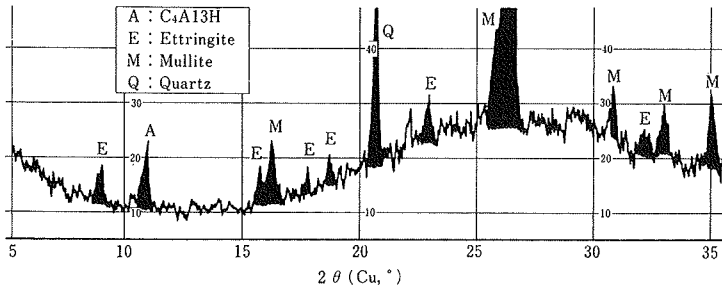


図-7 石炭灰 J を用いたアクアソイル固化体の X 線回折図

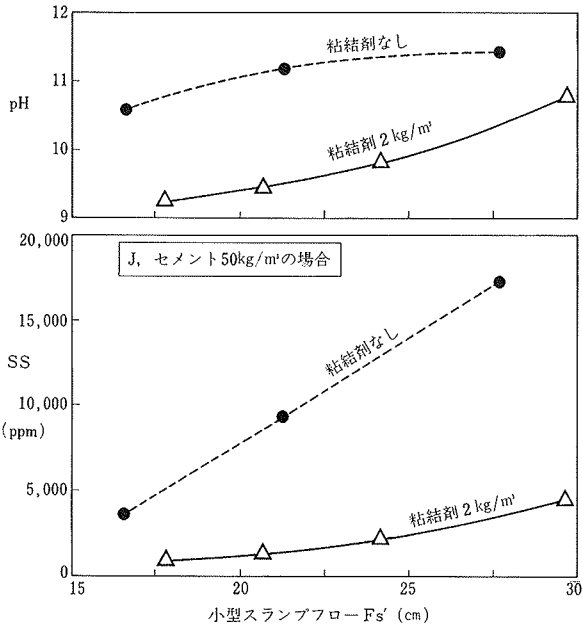


図-8 小型スランプフローと水中投入直後の水質の関係例

アクアソイルの水中分離抵抗性が重要である。

石炭灰を用いたアクアソイルの水中分離抵抗性の試験結果の一例(石炭灰 J, セメント量 50 kg/m³)を図-8に示す。水中投入した直後の水の pH 及び SS は、粘結剤を添加・無添加いずれの場合とも、アクアソイルの小型スランプフロー F_{s'} が大きくなるのに伴って増大した。そして、同一の F_{s'} で比較すると、粘結剤を添加した場合の pH 及び SS は、粘結剤を添加していない場合に比べて、かなり小さかった。以上の傾向は、他の石炭灰を用いた場合、またセメント量が異なる場合でも同じであった。従って、粘結剤は、石炭灰を用いたアクアソイルにも有効であり、施工条件や施工方法などに応じて適切に使用することが必要と考えられる。

5. まとめ

アクアソイルの土砂系材料として石炭灰を用いた場合のアクアソイルの性状について調査した。用いた石炭灰は、異なる火力発電所から発生した 4 種類であった。結果を以下に要約する。

(1) 石炭灰は、比重 2.2~2.3, 平均粒径(D₅₀) 12~35 μm の球状粒子を主体とし、化学成分

として SiO₂ や Al₂O₃ を多く含んでいた。

(2) 石炭灰を用いたアクアソイルの流動性を P ロートの流下時間 T_f 及び小型スランプフロー F_{s'} によって表わした。その流動性は、アクアソイル 1 m³ 中の水量とともに増大した。そして、一定の流動性を得るのに必要な水量は、石炭灰によってかなり異なった。

(3) 石炭灰を用い、セメントを 25~100 kg/m³ 添加し、F_{s'} = 19~22 cm に調整したアクアソイルは、フリージング率 3~5%, 固化後の湿潤密度 1.5~1.8 g/cm³ であった。そして、固化体の一軸圧縮強度 (qu) は、石炭灰 (A), セメント (C), 水 (W) の配合比 (質量として) との間に、 $qu = \alpha + (\beta_1 + \beta_2 \cdot W/A)C/W$ (ここで、 α, β_1, β_2 は定数) の関係が認められた。また、qu と材令 t (日) との間には、 $qu = 10^{a+bt}$ (ここで、a, b は定数, $t < 91$ 日) の関係が認められた。

(4) 石炭灰を用いたアクアソイルは、石炭灰によって程度の差があるが、いずれも大きな強度を発現した。この理由の 1 つとして、石炭灰とセメントの反応によって生成したと考えられるエトリンジャイトやアルミン酸カルシウム水和物が寄与していると推察された。

(5) 石炭灰を用いたアクアソイルの水中投入時の分離抵抗性は、F_{s'} の増大に伴い低下し、また粘結剤の添加によって著しく改善された。

参考文献

- 1) 喜田, 久保, 漆原: アクアソイル工法に関する研究 (その 1), 大林組技術研究所報, No. 34, (1987), pp. 47~51
- 2) 玉置, 堀内: 石炭灰の土木材料としての利用に関する研究 (その 1), 第 17 回土質工学研究発表会講演集, (1982), pp. 2661~2664