

石灰とフライアッシュの混合物を用いた粘性土と砂質土の安定処理の相違について

河野伊一郎*・富田武満**・上村克巳***・田辺和康****

フライアッシュはボゾラン物質として石灰とともに土質安定材として用いられている。近年では質の多様化した海外炭が使用されてきており、フライアッシュも様々なものが産出されている。本論文では海外炭を燃焼した質の異なる2種のフライアッシュを、砂質土と粘性土に適用した時の安定処理効果について検討したものである。その結果、フライアッシュの質と対象土質によって安定処理効果が異なることを明らかにした。そして、安定処理効果の判定を110°Cから200°Cの加熱減量値により評価できることを提案している。

Key Words : soil stabilization, flyash, lime, clay, clay mineral

1. まえがき

わが国における石炭の消費量は年々増加傾向にあり、海外輸入炭は安価で供給安定性に優れていることもあって、電力や鉄鋼工業界といった大口ユーザーは海外炭への依存度を拡大する方向にある。これにともない発生するフライアッシュも当然ながら増加が見込まれ、フライアッシュの有効利用の拡大が望まれている。諸外国では1970年代から土質安定処理材として活用されている。わが国においても良質なフライアッシュはセメントの混合材として活用されているが、未燃焼の炭素分を含有する低質材料はあまり使用されない。このような低質なフライアッシュに対しては「土質安定材」としての適用性が注目されており、各種の問題に対して研究がなされている(鳥居ら¹⁾、嘉門ら²⁾、三木³⁾、Diamond⁴⁾、嘉門ら⁵⁾)。海外炭は国内炭に比べ鉱物組成が変化してきており、フライアッシュも様々なものが産出している。このような状況を踏まえて、本論文では海外炭を燃焼したA発電所とB発電所の2種のフライアッシュ(A発電所のフライアッシュをFa材と称しB発電所のフライアッシュをFb材と称す)について、土質安定処理材としての適用性を調べた。対象試料には、粘性土と砂質土を用いて処理効果の検討を行った。

2. 実験概要

(1) 実験方法

土質安定材には化学組成の異なる2種のフライアッシュ(CaOを含むものと、含まないもの; Fa材, Fb材)と、消石灰(試薬一級水酸化カルシウム)を用いた。

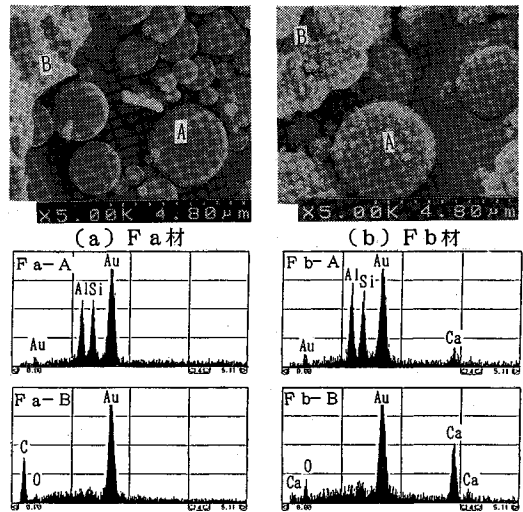


写真-1 フライアッシュの粒子形状

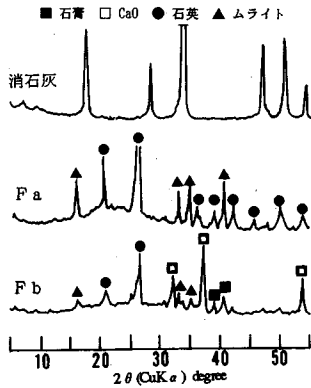
対象試料として、粘性土は単一粘土鉱物のモンモリロナイトとカオリナイトおよびハロイサイトを、砂質土では風化程度の異なる2種のまき土を使用した。

供試体の作製は、フライアッシュと消石灰を各種割合で配合調整したものを、試料に20%添加混合して動的締固め試験(JSF T 711)法により最適含水比と最大乾燥密度を求めた。そして、配合調整試料をその含水比と密度に成るように静的締固め試験(JSF T 812)法により供試体(直径5cm, 高さ10cm)を作製した。養生方法は、炭酸化反応を抑制するために密封養生(20°C)とし、所定の養生後に一軸圧縮試験, X線回折, 強熱減量試験を行った。

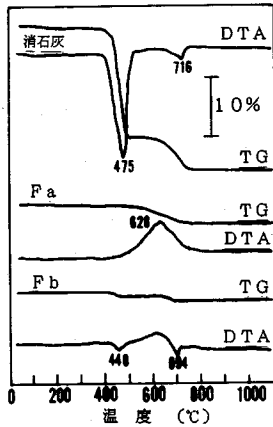
(2) 安定材の物理化学的性質

海外炭を燃焼したフライアッシュのFa材とFb材の2種を安定処理材として用いた。表-1にはフライアッシュの化学成分の定量値を示した。化学成分については

* 正会員 工博 岡山大学教授 工学部土木工学科
 ** 正会員 工博 福山大学教授 工学部土木工学科
 *** 正会員 矢橋工業(株) 開発部
 **** 正会員 福山大学助手 工学部土木工学科



図一 フライアッシュと消石灰の X 線回折図



図二 処理材の DTA-TG 曲線

SiO₂ と Al₂O₃ が全体の 70%~90% を占め、そのほかの成分は微量の酸化物より成っている。Fb 材は Fa 材に比べ SiO₂ が少なく CaO と SO₃ が多く含まれている。そして Fb 材の pH 値は強アルカリを示す。写真-1 ではフライアッシュの粒子表面を走査型電子顕微鏡により観察し、微小領域の元素分析を X 線マイクロアナライザーにより定性した。両試料ともに球形粒子 (A) と不定形の綿状粒子 (B) より成っているが、Fb 材は球形粒子の表面に綿状粒子が付着しているようにみられる。また、元素分析結果より球形粒子はアルミ (Al) と珪酸 (Si) が主成分で、綿状粒子は酸素 (O) と炭素 (C) を含有していることが推察される。そして Fb 材はカルシウム (Ca) を含有している (試料作製は金 (Au) 蒸着被膜法による)。

図-1 には X 線回折結果を示した。アルカリ刺激材として用いた消石灰 (W 社の試薬一級水酸化カルシウム) は、X 線回折ピークに見られるように純度の良い材料である。また、フライアッシュについて全体を概観すると、ピークがブロード状態になっている 2θ=15~30° の非晶質なガラス相の存在と結晶性鉱物の石英およびムライトのシャープな回折ピークが存在している。

表一 フライアッシュの化学成分

フライアッシュ	化 学 組 成										
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	pH
Fa	61.21	1.08	33.11	1.21	2.19	0.20	0.43	0.19	0.37	0.01	8.34
Fb	43.82	1.38	31.64	4.53	1.28	14.65	-	0.12	0.45	2.13	12.13

表二 粘性土の物理化学的性質

試料	液性限界 W _L (%)	塑性限界 W _p (%)	比重 G _s	置換性塩基 (meq/100g)				CEC (meq/100g)
				Mg ²⁺	Ca ²⁺	Na ⁺	K ⁺	
モンモリロナイト	393.20	41.24	2.60	1.36	17.29	37.13	0.82	51.28
カオリナイト	76.80	32.83	2.55	0.91	1.25	0.41	0.06	6.72
ハロサイト	81.50	35.87	2.56	5.52	12.21	1.89	0.10	24.80

表三 粘性土の化学成分

試料	化 学 組 成										
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₂
モンモリロナイト	74.25	0.11	17.11	1.70	0.06	2.97	1.83	1.03	0.13	-	0.80
カオリナイト	52.28	1.50	43.44	0.65	-	1.45	0.01	0.53	0.06	0.08	-
ハロサイト	59.07	0.82	35.73	1.30	-	1.70	0.14	0.48	0.70	0.05	-

Fa 材のものはムライトが主成分で、Fb 材のものはムライトの他に生石灰および石膏が含まれているものとみられる。次に示差熱分析結果を図-2 に示した。フライアッシュに含有される鉱物の違いが示差熱分析による DTA 曲線にみられる。Fa 材の 630°C 付近の発熱ピークは炭素の燃焼による発熱ピークで、熱重量測定による TG 変化でその質量減量値を表しているように考えられる。Fb 材にもその発熱ピークが小さく現れている。この発熱ピークからみて、Fa 材は炭素分をかなり含有しているものと予想される。X 線マイクロアナライザーによる定性結果においてもその傾向がみられる。Fb 材の 450°C と 694°C の吸熱ピークは、Ca(OH)₂ の吸熱ピークの温度付近で現れていることから石灰系 (CaSO₄, CaO) 鉱物であることが認められる。この様に化学的性質の異なる 2 種のフライアッシュを用いて、土質安定処理効果の検討を行った。

(3) 対象試料の物理化学的性質

粘性土試料の物理化学的性質を表-2 に示した。モンモリロナイト試料は三層構造よりなり、その層間に水分子を取り入れることから液性限界は必然的に高い値を示すが、カオリン鉱物のカオリナイトとハロサイト試料は二層構造よりなっているために液性限界は小さい値を示す。液性限界付近から乾燥させながら得られる塑性限界については、各鉱物ともに著しい差異は認められない。置換性塩基に着目すると、モンモリロナイト試料は Na⁺ を 37 (meq/100g) 程度含有していることがコンシステンシー特性に影響しているものと考えられる。表-3 の化学成分の SiO₂ と Al₂O₃ の含有量に着目すると、モンモリロナイト試料は SiO₂ を 74%、Al₂O₃ を 17%、カオリナイト試料は SiO₂ を 52%、Al₂O₃ を 43%、ハロサイト試料は SiO₂ を 59%、Al₂O₃ 36% 程度含有している。これらは安定処理による反応生成物と密接な関係にある成分であり興味もたれる。

表-4 まさ土の物理的性質

まさ土	土粒子 比重	粒度分布 (%)			強熱減量 (%)		
		粘土分	シルト分	砂分	110℃	200℃	800℃
風化	2.706	18.0	13.4	68.6	18.83	0.66	5.67
未風化	2.752	4.0	7.2	88.8	14.55	0.20	7.84

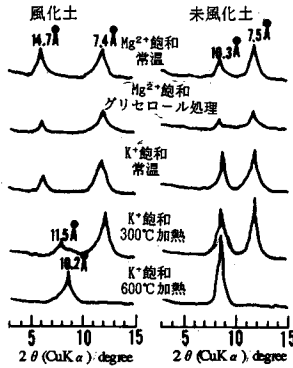


図-3 まさ土のX線回折

砂質土試料は、風化程度の異なる2種のまさ土(領家帯)を用いた。その物理的性質の結果を表-4に示す。風化程度を知るために強熱減量試験によって、非晶質鉱物と結晶質鉱物の脱水減量値より風化程度を判別した。非晶質鉱物は北川⁶⁾の方法に準じた200℃加熱減量により求め、結晶質鉱物は800℃の加熱条件で検討を行った。非晶質鉱物の脱水減量値が高いものを風化、低いものを未風化試料とし、逆に結晶質鉱物の脱水減量値が高いものを未風化、低いものを風化と判別した。粒度分布よりみると、風化試料は未風化試料に比べて粘土分とシルト分を多く含んでいる。図-3には定方位試料によるX線回折図を示した。風化試料について見ると、Mg²⁺飽和処理では14.7Å、7.4Åの回折ピークを示し、エチレングリコール処理を施しても影響は見られなかった。このことは、モンモリロナイト、膨潤性クライト、ハロイサイトが存在しないことを示している。K⁺飽和加熱処理では14.7Å→10Åに変化することからパーミキュライトが予想され、7.4Åの回折ピークが600℃加熱で消失していることよりカオリン鉱物の存在が認められる。未風化試料ではカオリン鉱物(7.5Åのピークが600℃加熱で消失)とマイカ(10.3Åのピークが各種処理を施しても影響が見られない)の存在が認められた。

3. フライアッシュ・消石灰処理土の工学的性質

(1) 動的締固め特性

土の締固め曲線に見られる締固め密度と含水比依存性について、建山⁷⁾は次のように述べている。土が不飽和状態にあるときの締固め曲線の密度は、含水比がある程度大きくなるまでは土粒子が移動し易く含水比とともに

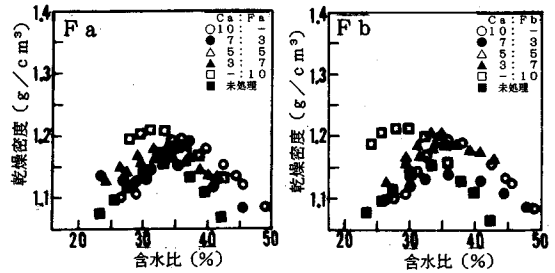


図-4 モンモリロナイト試料の締固め曲線

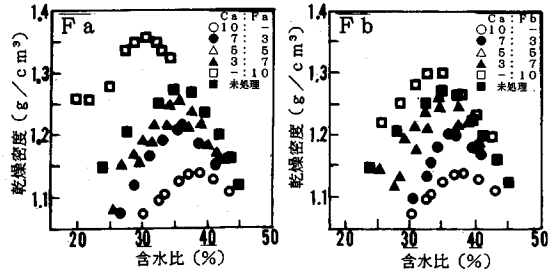
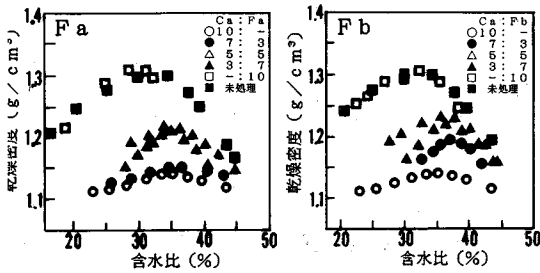


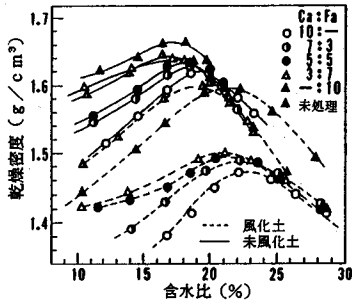
図-5 カオリナイト試料の締固め曲線

増加する。土が飽和状態になると、間隙は水で満たされて空気を排出して締固まることができなくなり、密度は含水比が増加するにつれてその分だけ減少する。また嘉門⁸⁾は粘性土の締固めによる構造変化について、最適含水比より低い含水比で締固めたものはランダム構造をとり、水分の増加に伴って粒子間の潤滑がよくなってランダム度が減少し、最適含水比では不完全配向構造をつくることを報告されている。これらは砂質土と粘性土の単味試料について、含水比にともなう土構造の締固め性状を指摘しているものであり、安定処理土との関連性については検討されていない。ここでは、粘性土と砂質土を対象に、フライアッシュと消石灰を安定処理材として用いた場合の締固め挙動について、建山と嘉門により報告されている結果をもとに検討を行った。

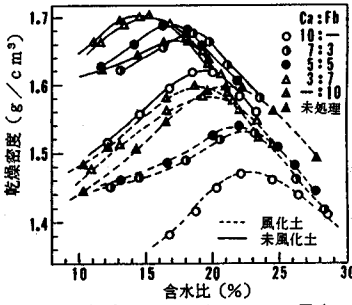
粘性土試料にフライアッシュ・消石灰を添加した締固め特性の結果を図-4、図-5、図-6に示した。図-4のモンモリロナイト試料については、処理試料の最適含水比が全体的にあまり変化せず、未処理試料に比べて最大乾燥密度が増加を示した。そして、フライアッシュと消石灰単味のものほど密度増加を示していることから、ベッド構造が形成されていることが推測される。図-5のカオリナイト試料は、モンモリロナイト試料に比べて締固め曲線が鋭い山形の曲線を示している。そして、フライアッシュと消石灰の複合処理試料は未処理試料の密度より低く、消石灰単味の試料は密度が最も低い結果を示した。一方、フライアッシュ単味試料は未処理試料に比べて高密度を示した。図-6のハロイサイト試料もカオリナイト試料と同様な傾向を示しているが、締固め曲



図—6 ハロイサイト試料の締固め曲線



(a) フライアッシュ Fa

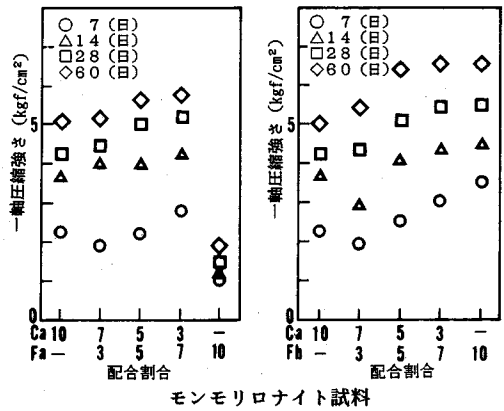


(b) フライアッシュ Fb

図—7 まさ土の締固め曲線

線はゆるい山形の曲線を示した。つまり、フライアッシュは球形に対して消石灰は綿状の粒子形状をしている違いが締固め密度に現れているようである。また、安定処理材を添加すると物理的・化学的性質が変化し、これらの相互作用も締固め性状に影響するものと考えられる。

砂質土試料にフライアッシュ・消石灰を添加した締固め特性の結果を図—7に示した。この図—7(a)はFa材を、また図—7(b)はFb材を用いた場合の結果である。処理試料はフライアッシュの配合割合が高くなれば最適含水比が減少して最大乾燥密度が増加傾向を示すことが共通して認められた。また、未処理試料に比べFa材処理試料は全てが密度の低下を示し、Fb材処理試料は密度の増大を示す試料も見受けられる。このように、締固め特性はフライアッシュの種類によって、ファイラ材としての効果と粒子間の保水能力におよぼす影響が異なるものと考えられる。鳥居³⁾によれば、フライアッシュ



図—8 (a) フライアッシュ・消石灰処理による強度特性

が締固め密度を増大させる役割を次のように述べている。砂質土に対しては土粒子間の空隙を充填するファイラ材としての効果が大きく、また粘性土に対しては保水能力を低下させる効果のあることを明らかにしている。

(2) 強度特性

粘性土試料の3種鉱物を対象に、安定処理による強度特性を図—8(a), (b), (c)に示した。図—8(a)のモンモリロナイト試料の強度特性では、Fa材は消石灰とフライアッシュの複合処理によって強度発現を示し、フライアッシュ単味処理では十分な処理効果は引き出せないようである。一方、Fb材は単味処理が最も強度改善を示し、初期強度も他の処理試料に比べて強度増加を示している。配合割合別に処理効果を見ると、Fa材はCa:Fa(3:7) > Ca:Fa(5:5) > Ca:Fa(7:3) > Ca > Fa, Fb材はFb > Ca:Fb(3:7) > Ca:Fb(5:5) > Ca:Fb(7:3) > Caの傾向が認められ、フライアッシュの配合割合の高いものほど強度が改善された。図—8(b)のカオリナイト試料と図—8(c)のハロイサイト試料についても同様な傾向が認められた。Fa材は消石灰によるアルカリ刺激が必要な材料であり、Fb材は自硬性を有する材料であることが明らかとなった。ここでフライアッシュ材料の違いを表—1の化学成分より比較すると、Fb材はCaOを14%程度含有し強アルカリ性の材料であるのに対して、Fa材はCaOをほとんど含まず弱アルカリ性である違いが安定処理効果に現れているように思われる。粘土鉱物に対する強度発現性は、ハロイサイト(60日養生で10~12 kgf/cm²) > カオリナイト(60日養生で7~10 kgf/cm²) > モンモリロナイト(60日養生で6 kgf/cm²)の順に高強度を示した。このように粘土鉱物の種類によって強度発現性に相違がみられるが、これはボゾラン反応の進行にともなう土粒子間結合力による影響が処理強度特性に現れていることを予想させる。

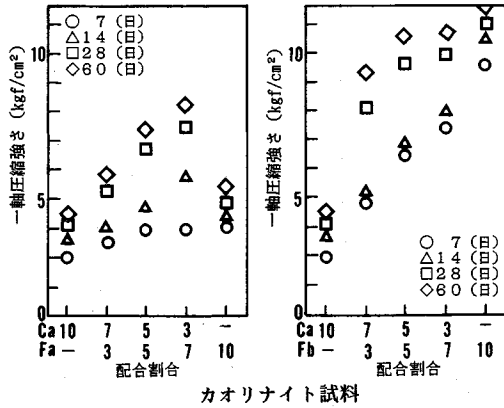


図-8 (b) フライアッシュ・消石灰処理による強度特性

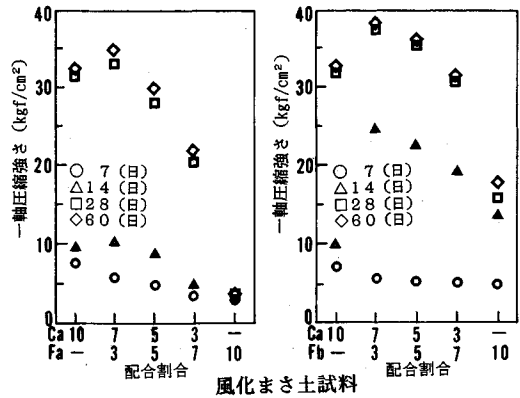


図-9 (a) フライアッシュ・消石灰処理による強度特性

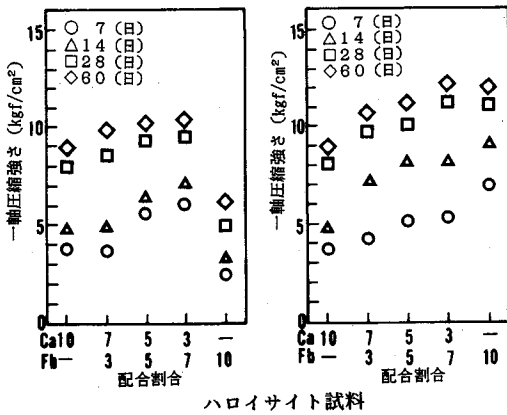


図-8 (c) フライアッシュ・消石灰処理による強度特性

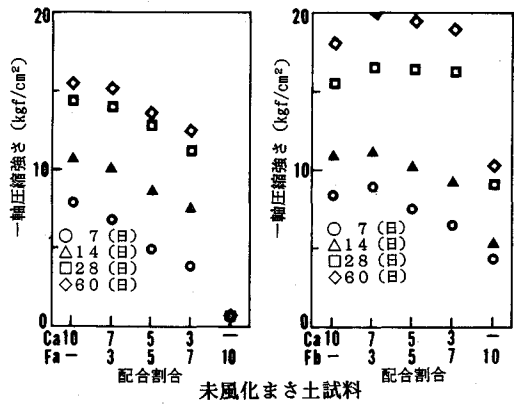


図-9 (b) フライアッシュ・消石灰処理による強度特性

砂質土の風化程度の異なる2種のまさ土試料を対象とした強度特性を図-9 (a) と (b) に示す。全体を概観すると次のような結果が得られた。Fa材とFb材の単味処理試料については、Fa材は消石灰によるアルカリ刺激の必要な材料であり、Fb材は粘性土試料に比べると劣るものの安定処理効果が認められる。消石灰とフライアッシュによる複合処理試料では、消石灰による処理効果が大きく、その配合割合はCa:F=7:3の配合試料が最適な割合となり、より多くの石灰を添加しても著しい強度増加は望めないようである。このことは、フライアッシュのポゾラン物質が有効に働いていることを示唆している。また、風化試料と未風化試料特性を比較すると、粘土分を含む風化試料の方が2倍程度の強度増加が得られた。配合割合の変化にともなう改良強度の発現特性についてみると、まさ土に対しては消石灰が、粘土鉱物に対してはフライアッシュが発現特性に寄与しているものと考えられる。

以上の結果より、フライアッシュはCaOを含有しているものほど処理効果が認められ、強アルカリ性の下で反応が活発となっているようである。つまり、フライアッ

シュ自身がポゾラン材料であるためにポゾラン反応を進行するために必要な石灰が長期においても残存していることが安定処理効果につながるものと考えられる。粘性土試料の粘土鉱物はカオリン鉱物のものほど反応生成物による土粒子間結合力が增大して強度改善に寄与していることが明らかとなった。そしてフライアッシュによる処理効果が認められた。砂質土試料は細粒分を含む風化まさ土が強度増加を示し、消石灰による処理の方が有効であることが判明した。これらの強度改善に寄与する反応生成物に対する検討は次のX線回折分析により行う。

4. フライアッシュ・消石灰処理土の改良メカニズム

(1) X線回折による検討

Leonard and Davidson¹⁰⁾によれば、フライアッシュ—石灰—粘性土の反応生成物をX線回折と示差熱分析により検討を行っている。各鉱物の間には主としてCSH (I) 系の反応生成物が生成すると論じており、彼らはこの中で9-14 Å付近にピークが生じることを明らかにしている (トベルモライトのピークと重複す

表-5 ケイ酸石灰水和物の X 線回折ピーク

d Spacings in Å	Relative Intensity
9-14 (highly variable)	10
3.06	10
2.81	8
1.83	8
1.67	4
1.53	2
1.40	4
1.17	1
1.11	2
1.07	1

る). そして各ピークは必ずしもブロードでないと述べている. この他に表-5に挙げるピークが認められるとしている. この中で3.06ÅのピークはCaCO₃の3.03Åのピークと重複し, 2.81Åのピークは石英のピークと重複するため明瞭な区分はできないことを指摘している. 鳥居¹⁾らは, 締固めたフライアッシュの反応過程の検討を行っている. その結果によると, 材令の経過に伴いエトリンガイトの生成反応が進行しており, フライアッシュ中に含有されている遊離石灰および無水石膏の量が締固めたフライアッシュの強度発現に大きな影響をおよぼしていることを報告している.

粘性土試料に対する X 線回折結果を図-10 (a), (b), (c) に示した. 図-10 (a) のモンモリロナイト試料の結果では, Fa 材処理は3.88Åにエトリンガイトの反応生成物の回折ピークがみられる. Fb 材処理にもエトリンガイトの回折ピークが3.88Å, 4.03Å, 9.7Åに認められた. 消石灰処理では2.63Åと4.9ÅにCa(OH)₂が残存し, 9.7Åにエトリンガイトの回折ピークがみられた. そして, 各処理試料ともに12.6Åの粘土鉱物の回折ピークは養生日数についてシフトしている. これは, モンモリロナイト鉱物の結晶構造破壊が起こっていることを暗示しているものと考えられる. 図-10 (b) のカオリナイト試料についてみると, Fa 処理試料でエトリンガイト (5.6Å) が生成され, Fb 処理試料ではエトリンガイト (5.6Å, 9.7Å) と新たに加水ゲレナイト水和物 (2.85Å, 12.5Å) の回折ピークがみられる. 消石灰処理では, Ca(OH)₂ (2.63Å, 3.11Å, 4.9Å) が残存している. 図-10 (c) のハロイサイト試料はカオリナイト試料とよく似た傾向で反応生成物が推移している.

表-6には反応生成物の X 線回折強度と養生日数との関係を示したものである. モンモリロナイトのフライアッシュ処理試料は養生日数の経過につれてエトリンガイトの回折強度が高く, 石灰処理試料は逆に低くなっている. この低下は微量の炭酸化反応によるものと推測される. 次にカオリナイトとハロイサイトの Fa 処理試料については, モンモリロナイトのフライアッシュ処理試料と同様な傾向を示しているが, Fb 処理試料は加水ゲレナイト水和物の生成に伴ってエトリンガイトの回折強

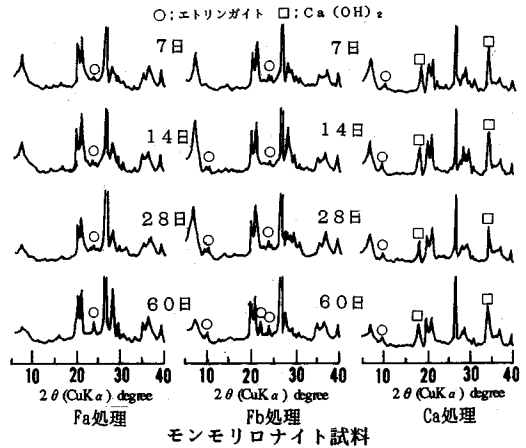


図-10 (a) フライアッシュ・消石灰処理による X 線回折

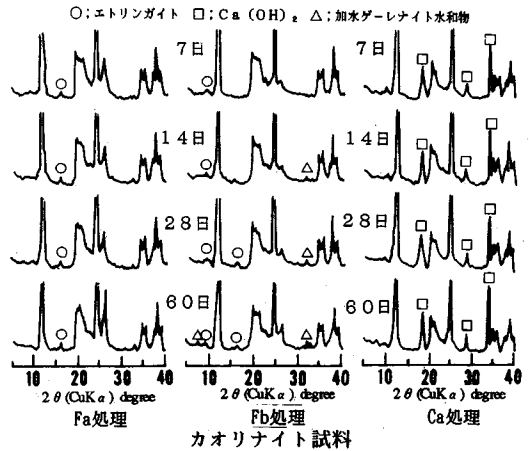


図-10 (b) フライアッシュ・消石灰処理による X 線回折

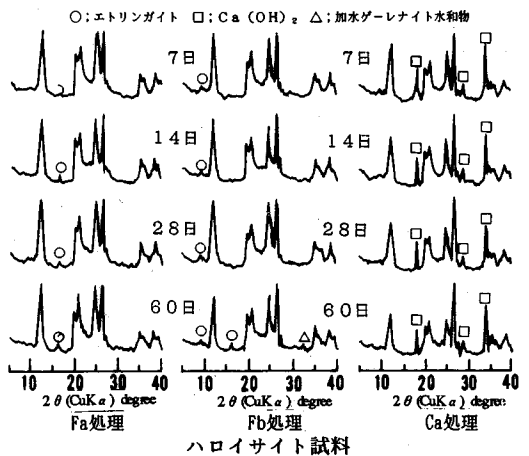


図-10 (c) フライアッシュ・消石灰処理による X 線回折

表-6 反応生成物の X 線回折強度

養生日数	7日	14日	28日	60日
モンリナイト	F a E:90	E:99	E:96	E:261
	F b E:139	E:87 E:122	E:122 E:113	E:217 E:244 E ₂ :108
	C a E:104	E:122	E:122	E:87
カナイト	F a E:89	E:122	E:122	E:141
	F b E:122	E:70 G:52	E:104 E:70 G:52	E:52 E:73 G:52G ₂ :87
ハサロイト	F a E:35	E:96	E:87	E:139
	F b E:87	E:87	E:104	E:87 E:90 G:87

E:エトリンガイト G:加水グーレンナイト水和物 単位: CPS

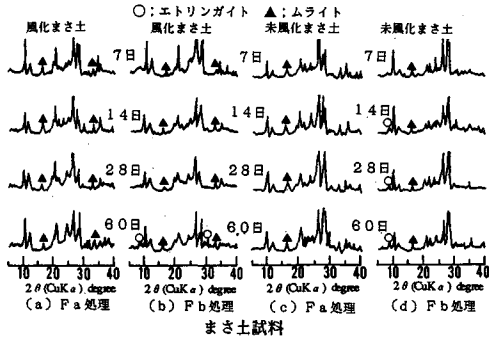


図-11 フライアッシュ処理による X 線回折図

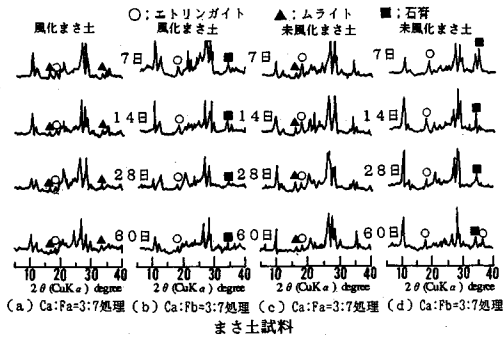


図-12 フライアッシュ・消石灰処理による X 線回折図

度が低くなっていることがわかる。

砂質土試料に対する X 線回折結果を図-11 と 12 に示した。図-11 のフライアッシュ単味処理試料では、フライアッシュに存在したムライトの回折ピークが全ての試料にみられ、反応生成物としては Fb 処理試料でエトリンガイトが認められた。図-12 の消石灰とフライアッシュの複合処理試料 (Ca : F = 3 : 7) においては、Fa 処理試料にムライトとエトリンガイトの回折ピークを示し、Fb 処理試料ではムライトの回折ピークは消失しており、エトリンガイトと石膏の存在が認められた。フライアッシュ単味よりも石灰との複合処理の方が反応は活発であることが認められた。

以上の結果より、鳥居はエトリンガイトの反応生成物が強度発現に影響していることを明らかにしているが、本論文でも同様な結果が得られた。Leonard らの指摘している 9~14Å の範囲に反応生成物らしきピーク (12.6Å) が認められる試料もあるが、X 線回折結果の

みで判断することは不可能なために、今後の課題とする。

(2) 強熱減量法による検討

強熱減量試験による脱水減量値から土質安定処理効果を判定する方法について提案するものである (富田・田辺¹¹⁾)。この脱水減量値は、安定処理材を添加することによって起こる反応生成物と粘土鉱物中の構造水の脱水変化より求める。試験手順としては、磁性ルツボに養生後の処理試料を 10g 程度入れて初期質量を測定する。次にマッフル炉 I 型 (KOYO 製、温度制御精度 ±2°C) 内で 110°C の加熱に設定し層間水と吸着水を除去する。次に 200°C 加熱の設定で非晶質鉱物と反応生成物による構造水の脱水減量を求める。そして、800°C 加熱により結晶質鉱物と反応生成物の構造水の脱水減量を求めた。

粘性土試料に対する強熱減量試験の結果を図-13 (a), (b), (c) に取りまとめた。200°C 加熱による脱水減量変化をみると、フライアッシュ・消石灰による複合処理試料は配合割合と養生日数によって脱水減量変化を示し、強度特性とよく似た傾向を示している。脱水減量値の高いものほど強度改善を示していることが認められた。また、フライアッシュ単味試料についても同様な傾向が認められた。一方、800°C 加熱による脱水減量変化は消石灰を多く含む配合割合のものほど脱水減量値は高く、一定の傾向で脱水減量変化を示した。また養生日数に対する脱水変化についても明らかな差がみられない。これは、消石灰の熱分析結果 (図-2) をみるとわかるように、475°C と 716°C 付近で吸熱ピークが起り約 27% の脱水減量を示していることが要因として考えられる。つまり、消石灰の脱水減量値が大きいために反応生成物と結晶構造の脱水減量変化が明確に現れないようである。安定処理材によって処理土内部に発現した生成物は、200°C 加熱の温度域で顕著な脱水減量変化を示していることが認められた。

砂質土試料に対する強熱減量試験の結果を図-14 (a), (b) に示す。200°C 加熱より得られた脱水減量値は、図-9 (a) と (b) の強度特性との関係を回帰分析結果よりみると、風化まさ土の Fa 処理試料; 相関係数 $r^2=0.914$, Fb 処理試料; $r^2=0.965$ が得られ、相関係数が認められる。未風化まさ土の Fa 処理試料; $r^2=0.800$, Fb 処理試料; $r^2=0.713$ の関係が得られ、ある程度の対応性が認められた。粘性土試料の脱水量変化と比べて、砂質土のほうが明瞭に現れている。西田ら¹²⁾によれば、まさ土の石灰安定処理効果の発現は、石灰添加量と Al_2O_3/SiO_2 に支配され、特に風化度の大きい試料ほど Al_2O_3/SiO_2 が大きくなり、石灰添加量が一定の下で圧縮強度は増大することを報告している。このように、非晶質鉱物がポズラン材と反応する結果として圧縮強度が増加傾向を示すことを裏付けている。その結果が

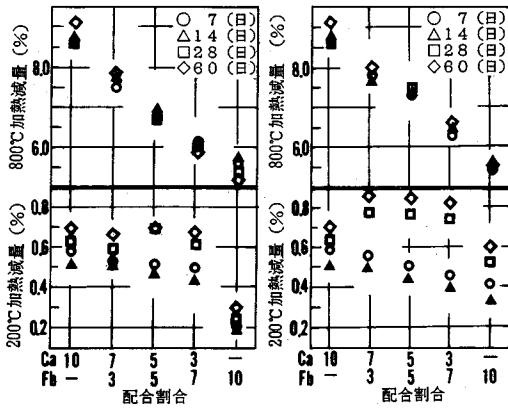


図-13 (a) フライアッシュ・消石灰処理によるモンモリロナイト試料の強熱減量特性

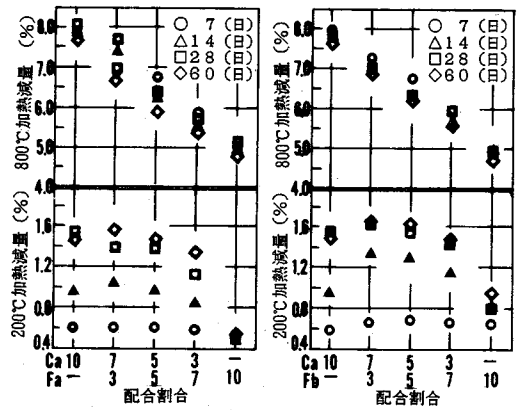


図-14 (a) フライアッシュ・消石灰処理による風化まき土の強熱減量特性

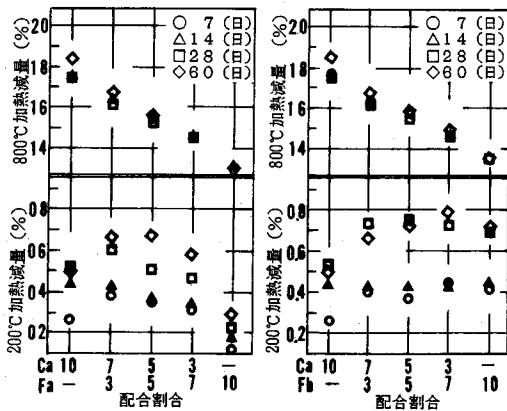


図-13 (b) フライアッシュ・消石灰処理によるカオリナイト試料の強熱減量特性

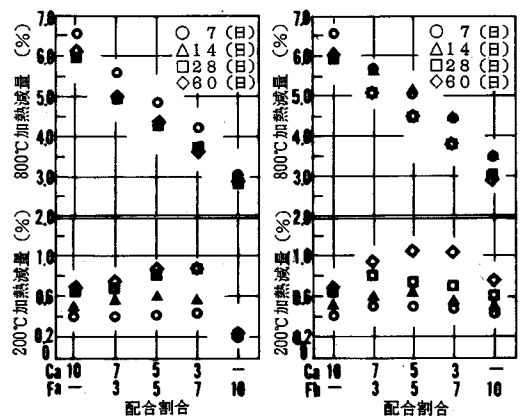


図-14 (b) フライアッシュ・消石灰処理による未風化まき土の強熱減量特性

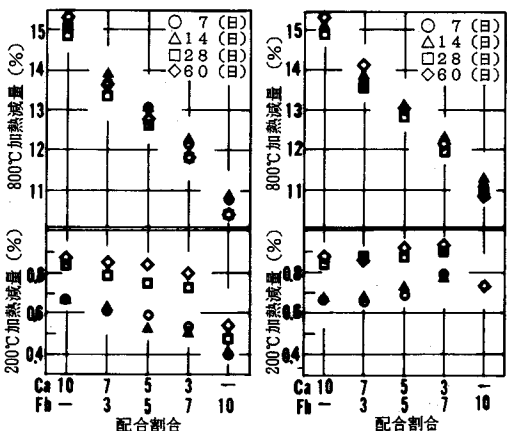


図-13 (c) フライアッシュ・消石灰処理によるハロイサイト試料の強熱減量特性

200°C加熱の減量値にも現れているものと考えられる。また、荒井¹³⁾はCaOとSiO₂の混合比に対する水熱反応におけるCaO-SiO₂-H₂O系化合物の安定領域について検討を行っているが、その結果をみると350°C以下

であることが認められる。よって、800°C加熱では粘性土試料と同様に安定処理効果を判定することができない。

200°C加熱による脱水減量値を反応生成物と関連づけることは早計かも知れないが、低温域で検討する必要のあることが明らかとなった。特に非晶質鉱物を含有するまき土の安定処理特性の判定には有効であることが明らかとなった。800°C加熱では安定処理材の脱水減量が起るために土質改良効果の判定法としては不可能であることが判明した。

5. 結 論

フライアッシュによる粘性土と砂質土の安定処理効果について検討を行った。得られた結果をまとめると以下のようなになる。

(1) フライアッシュの鉱物はムライトの結晶鉱物と石灰および石膏を含有していることが認められた。そして、ポズラン反応に関与するSiO₂とAl₂O₃が全体の70%~90%を占めている。

(2) 粘性土による締固め特性では、粘土鉱物によって間隙保水状態が異なり、また処理材を添加すると物理・化学的性質の変化による土粒子間結合力の相互作用が締固め性状に影響を与えている。

(3) 砂質土による締固め特性は、間隙を充填するファイバー材としての効果と粒子間の水分保持能が密接に関連しているものと考えられる。

(4) 強度特性の結果より、フライアッシュは微量の石灰と石膏を含有しているものほど自硬性を有している。また、少量のアルカリ刺激効果によりポゾラン反応が活発になるものと推定される。

(5) 粘性土試料に対しては、フライアッシュと消石灰の複合処理試料が強度発現を示し、カオリン系鉱物のものほど土質改善を示した。

(6) 砂質土試料では、消石灰処理が土質改善に寄与し、細粒分(非晶質鉱物)を多く含む試料のものほど処理効果が認められた。

(7) 土質改善に寄与する反応生成物は、粘性土と砂質土の両試料ともにエトリンガイトが強度発現に寄与していることが判明した。

(8) 強熱減量法により安定処理効果の検討を行った結果、200°C加熱により得られる脱水減量値が土質安定処理特性の判定に有効であることが認められた。

参 考 文 献

- 1) 鳥居和之・川村満紀・柳場重正：締固めた石炭灰における反応生成物と強度に関する基礎的研究，土木学会論文集，第372号，pp. 65-74，1986。

- 2) 嘉門雅史・Supakij, N.・勝見 武：産業廃棄物の固化処理による有効利用，材料，Vol. 40, No. 459, pp. 22-28, 1991。
- 3) 三木五三郎：石炭灰による土地造成の問題点，材料，Vol. 9, No. 205, pp. 64-68, 1970。
- 4) Diamonds, S.: The Utilization of Fly Ash, Cement and Concrete Research, Vol. 14, No. 4, pp. 455-462, 1984。
- 5) 嘉門雅史・友久誠司・壺内賢一：フライアッシュとコンクリート微粉末の固化による有効利用について，第42回土木学会年次学術講演会，Ⅲ-377, pp. 776-777, 1987。
- 6) 北川靖夫：土壌中のアロフェンおよび非晶質無機成分の迅速定量法，日本土壤肥料学雑誌，第48巻，pp. 124-129, 1977。
- 7) 建山和由：土の締固め施工の合理化に関する研究，京都大学学位論文，1988。
- 8) 嘉門雅史・安原一哉・喜田太三：土の物理化学と土質工学への応用，土と基礎，Vol. 33, No. 11, pp. 75-84, 1985。
- 9) 鳥居和之：産業副産物の土質安定処理への有効利用に関する研究，京都大学学位論文，1985。
- 10) Leonard, R. J., Davidson, T.: Pozzolanic Reactivity Study of Flyash, HRBB, 231, pp. 1-17, 1959。
- 11) 富田武満・田辺和康・山崎恭司・上村克巳：フライアッシュによるまさ土の安定処理に関する研究，廃棄物埋立地盤の跡地利用に関するシンポジウム発表論文集，pp. 95-100, 1991。
- 12) 西田一彦・佐々木清一・久保井利達：まさ土の非晶質物質特性と石灰安定処理効果，材料，第37巻，第422号，pp. 21-25, 1988。
- 13) 荒井康夫：セメントの材料化学，大日本図書，pp. 119-160, 1991。

(1992. 7. 28 受付)

A COMPARISON OF STABILIZATION EFFECTS OF LIME-FLYASH MIXTURES FOR CLAY AND SANDY SOILS

Ichiro KOHNO, Takemitsu TOMITA, Katsumi KAMIMURA and Kazuyasu TANABE

This study investigated stabilization effects for clay and sandy soils using two types of lime-flyash mixtures as stabilizing reagents. The results are summarized as follows.

- 1) Flyash containing small amounts of gypsum and lime could be used as a soil-stabilizing reagent without any further addition of lime.
- 2) Small amounts of alkali in the flyash were found to stimulate the occurrence of pozzolanic reactions.
- 3) Ettringite, which formed during the curing process, helped to strengthen treated soils.
- 4) The increase in strength for kaolinite was considerably greater than other clay mineral specimens.
- 5) Among the sandy specimens, weathered samples containing larger amounts of clay showed a greater increase in strength.
- 6) Stabilization effects could be estimated from the ignition loss of clay minerals. Furthermore, it was discovered that there was a relationship between strength and ignition loss values of 110°C-200°C.