

路盤・盛土材料としての締め固めたフライアッシュ ——炉底灰混合物の強度と耐水性——

Strength and Resistance to Immersion in Water of Compacted Fly Ash-Furnace Bottom Ash Mixtures as Road Base or Embankment Materials

とり い かず ゆき* かわ ひら みつ のり紀**
鳥 居 和 之* 川 村 満 紀**

1. ま え が き

石炭の燃焼に伴って多量に発生する石炭灰は、採取場所によりフライアッシュ、シンダーアッシュおよび炉底灰に分類できる。現在、良質のフライアッシュがセメント原料、コンクリート用混和材および地盤改良材などの建設用材料として利用されているが、このような用途に有効利用されている量は石炭灰の発生量全体の20~30%にすぎず、大部分の石炭灰（フライアッシュ（原粉および粗粉）、シンダーアッシュおよび炉底灰）については火力発電所の近くの灰捨て場に埋立材料として廃棄されているのが現状である。石炭灰の発生量は年間約400万トン程度と推定されているが、石炭火力発電所の新設や石炭燃焼炉の大容量化によって石炭灰の発生量は年々増加する傾向にあり、その一方で石炭灰を処理する灰捨て場を確保することが用地の取得難や環境上の制約により次第に困難となってきた¹⁾。

石炭灰の物理的・化学的性状（粒子形状、粒度分布およびポゾラン材料としての性能など）を活用した用途として、石炭灰はダムや道路などの路盤・盛土材料として有効に利用することができ、実際に諸外国では石炭灰の路盤・盛土材料としての利用法がある程度確立されている^{2),3)}。我が国でも、小規模な路盤・盛土への石炭灰の適用例は既にあり、このような用途への石炭灰の利用が今後増大していくものと考えられる⁴⁾。締め固めたフライアッシュは、単位重量が1.3~1.5tf/m³と比較的軽量であることのほかに、適度な水分が存在する状態で締め固めた場合には材齢の経過に伴って強度が増大するという路盤・盛土材料としての優れた性質を有するが、その一方で強度発現が十分でない時期に水浸させると強度が大きく低下することが確認されている⁵⁾。一方、締め固めた炉底灰は、単位重量が1.1~1.2tf/m³と締め固めたフライアッシュよりもさらに軽量になるが、締め固め時に粒子破砕が生じるなど締め固め効果に問題がある。

石炭灰を路盤・盛土材料として適切に有効利用するためには、土質材料としての締め固め性状ならびに締め固めた石炭灰混合物の強度、変形特性および耐水性などの諸性質について検討しておくことが必要である。本研究では、フ

ライアッシュ-炉底灰混合物の路盤・盛土材料としての適用性を調べることを目的として、フライアッシュおよび炉底灰の土質材料としての諸性質について検討するとともに、安定材を添加した締め固めたフライアッシュ-炉底灰混合物の強度、水浸膨張性および耐水性などについての検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本研究に使用した石炭灰（フライアッシュ（原粉）および炉底灰）はT火力発電所（石炭専焼、国内炭使用の新生

表-1 石炭灰の化学成分および物理的性質

		フライアッシュ	炉底灰
化 学 成 分 (%)	Ig. Loss	5.7	9.9
	SiO ₂	54.2	53.1
	Al ₂ O ₃	27.9	22.9
	Fe ₂ O ₃	6.1	6.8
	CaO	3.7	3.9
	MgO	2.5	1.6
	Na ₂ O	0.2	2.1
	K ₂ O	0.4	1.1
	残留炭素	4.6	6.9
物 理 的 性 質	比重	2.18	2.15
	見かけの比重	—	1.88
	単位容積重量 (kgf/l)	—	0.84
	ブレン値 (cm ² /g)	2980	—
	88μmふるい残分 (%)	8.1	86.8
	M. B. 吸着量 (mgf/g)	0.40	0.63

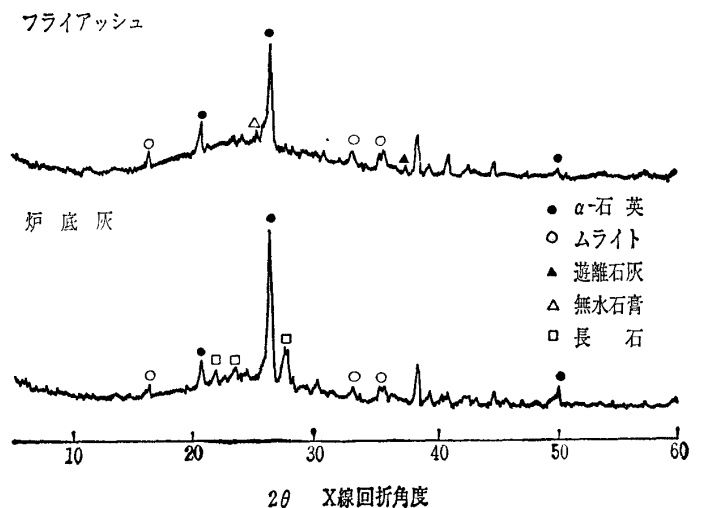


図-1 フライアッシュおよび炉底灰のX線回折図

*金沢大学講師 工学部土木建設工学科
**金沢大学教授 工学部土木建設工学科

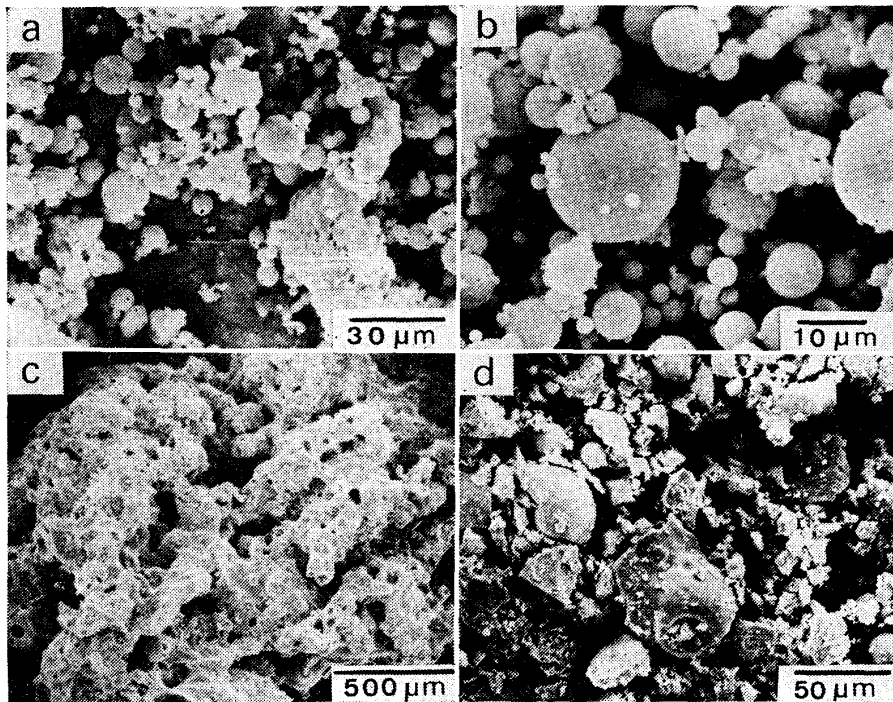


写真-1 フライアッシュおよび炉底灰の粒子形状
(a, b: フライアッシュ, c, d: 炉底灰)

灰)より供給されたものであり、それらの化学成分および物理的性質を表-1に示す。我が国で産出するフライアッシュの多くは、良質な瀝青炭を使用原料としていることから、ガラス相が40~60%程度であり、ポゾラン反応性が比較的良好である(ASTM Class F Flyash)。一方、炉底灰は、図-1に示すようにフライアッシュと比較してガラス相が減少し、 α -石英(SiO_2)およびムライト相($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$)などの結晶性鉱物や残留炭素量が多くなるために、ポゾラン反応性がフライアッシュと比較して低下する。粒子形状については、写真-1に示すようにフライアッシュは大部分が10~100 μm 程度の球形の粒子からなるが、不規則な形状の粒子、コークス状の未燃カーボンおよび中空状の粒子も一部存在する。一方、炉底灰は、数10 μm ~10mm程度の広い粒度範囲を持つ、比較的大きな角張った砂状の粒子で構成されており、内部組織は発泡のためかなり多孔質である。フライアッシュの比重は、鉱物組成および気孔率との関係から決まってくるが、通常2.2程度である。また、炉底灰は、多孔質の内部組織を持つために見かけの比重が1.9程度と小さいが、フライアッシュと同程度

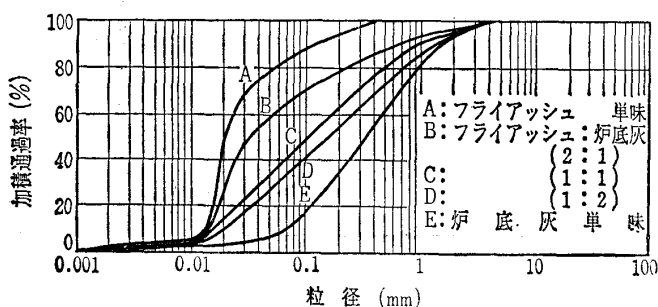


図-2 フライアッシュ-炉底灰混合物の粒径加積曲線

まで粉碎して測定した場合にはフライアッシュと同程度の比重が得られる。本研究に使用した石炭灰は、ビニール袋にて密封保存したフライアッシュおよび屋内にて自然乾燥し、最大粒径5mm以下にした炉底灰である。フライアッシュ-炉底灰混合物における混合比は2:1, 1:1および1:2であり、フライアッシュおよび炉底灰単独の場合と比較した。これらのフライアッシュ-炉底灰混合物の粒径加積曲線を図-2に示す。また、安定材としては、消石灰(略号L, 試薬一級品)、普通ポルトランドセメント(略号C, N社製)および消石灰(またはセメント)-石膏の組合わせ(石膏は2水塩の排煙脱硫石膏(略号G, F火力発電所産)であり、消石灰(またはセメント)/石膏比を3および1とした)を使用しており、安定材の添加量の範囲は石炭灰

の乾燥重量に対して2.5~15%である。

2.2 実験方法

(1) 一軸圧縮試験

フライアッシュ-炉底灰混合物は、締固め試験(JIS A 1210, 1.1-a)により求めた最適含水比の条件でソイルミキサーにて約5分間混合した後、最大乾燥密度となるように静的な締固め(土質工学会安定処理土試験方法(案))によって供試体(直径5cm, 高さ10cmの円柱体)を作成した。その後、供試体は温度20 $^{\circ}\text{C}$ の条件でビニール袋中にて密封養生を実施し、所定材齢(7日, 28日および90日)にて一軸圧縮強度(オートグラフ使用, ひずみ速度: 1%/分), 変形係数および超音波パルス速度を測定した。

(2) 水浸 CBR 試験

最適含水比の条件でランマーにより突き固めることによって CBR 供試体(JIS A 1211)を作成し、水浸膨張量および水浸 CBR 値を測定した。また、安定材を添加したものについては、消石灰添加では10日間, セメント添加では7日間それぞれ密封養生を実施した後に、同様な測定を行った。

(3) 耐水性試験

締め固めたフライアッシュ-炉底灰混合物の耐水性は、BS 1924に従って14日間密封養生を行った標準養生供試体と7日間密封養生後、水中に7日間浸漬した水中浸漬養生供試体の一軸圧縮強度を比較することにより行った。水中浸漬強度比(標準養生強度に対する水中浸漬強度のパーセント)が80%以上あれば、締め固めたフライアッシュ-炉底灰混合物の耐水性は十分に良好であると判定できる。

(4) 示差走査熱量測定(DSC), X線回折分析(XRD)

および走査型電子顕微鏡観察 (SEM)

締め固めたフライアッシュ-炉底灰混合物における反応過程および微視的構造の特徴を把握する目的で、常温にて24時間真空乾燥した粉末試料について示差走査熱量測定およびX線回折分析を行うとともに、真空乾燥後、炭素、白金で蒸着した試料について走査型電子顕微鏡による観察を行った。

3. フライアッシュ-炉底灰混合物の締め固め特性

本研究に使用したフライアッシュの液性限界は26%程度の値を示すが、塑性限界は測定が不能であり、土質材料としてのフライアッシュのコンシステンシーは非塑性である。また、炉底灰は砂分および礫分が全体の80~90%を占める粒度組成で、細粒分は少なく、そのコンシステンシーも同様に非塑性である。したがって、コンシステンシー、粒度組成および粒子形状より総合的に判断すると、フライアッシュおよび炉底灰の締め固め性状は比較的良好であるといえる^{6),7)}。

フライアッシュ-炉底灰混合物の締め固め曲線を図-3に示す。炉底灰を単独で締め固めた場合には、粒子の破碎が生じるとともに、細粒分が少なく、多孔質の構造のために締め固め時の乾燥密度が 1.1 g/cm^3 程度となる。一方、フライアッシュ-炉底灰混合物では、比較的少ないフライアッシュと炉底灰との混合においても炉底灰単独のものと比較して締め固め密度が増加する。特に、フライアッシュ-炉底灰(2:1)の混合比ではフライアッシュ単独のものよりも締め固め密度が大きくなる。フライアッシュと炉底灰の混合による締め固め密度の増大は、フライアッシュ粒子が炉底灰粒子間および炉底灰粒子中の間隙に入り込むことによる粗大な間隙の減少に起因するものと考えられる。フライアッ

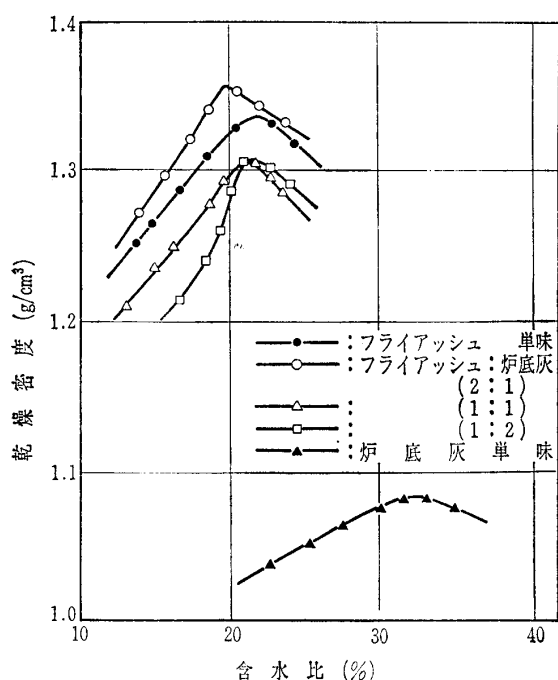


図-3 フライアッシュ-炉底灰混合物の締め固め曲線

シュ-炉底灰混合物の最適含水比および最大乾燥密度はそれぞれ20~22% および $1.30 \sim 1.35 \text{ g/cm}^3$ 程度であることから、締め固めたフライアッシュ-炉底灰混合物による路盤・盛土は通常の盛土材料と比較した場合には20~30%程度軽量(締め固め炉底灰の場合には30~40%程度軽量になる)となり、軟弱地盤における施工において多くの利点を有するものと考えられる。

4. フライアッシュ-炉底灰混合物の強度特性

締め固めた炉底灰混合物の一軸圧縮強度を図-4に示す。炉底灰を単独で締め固めた場合には材齢の経過に伴う強度の発現はまったく見られない。一方、消石灰を添加した場合、初期材齢における強度は小さいが、材齢の経過に伴い比較的大きな強度の発現が認められる。この強度発現は炉底灰中に含有されている微粉末が消石灰と反応することにより得られたものと推察される。しかし、炉底灰中でポゾラン反応に携わる $74 \mu\text{m}$ 以下の微粉末の量は15%程度と少ないために、消石灰の添加量による強度発現の相違はほとんど認められない。また、セメントを添加した場合、14日材齢以前の強度発現は小さいが、それ以後の材齢においてはセメント添加量に比例して強度が増加する。空隙の多い不連続な粒子構造を形成する締め固めた炉底灰では、セメントの水和反応過程での粒子間の結合が発揮されにくいため強度の発現が遅れるものと考えられる。安定材を添加した締め固めた炉底灰の変形係数には、 $E_{50} = (180 \sim 220)q_u$ の関係が認められた。

締め固めたフライアッシュ-炉底灰混合物の一軸圧縮強度を図-5に示す。締め固めたフライアッシュ-炉底灰混合物では、初期材齢においてはフライアッシュ-炉底灰(1:1)の混合比のものが最大の強度を示すが、長期材齢においてはフライアッシュの多い混合比のものほど強度の増加が著しく、28日材齢以後では締め固めフライアッシュが最大の強度を示す。この強度発現はフライアッシュのポゾラン反応の進行によるものである。すなわち、フライアッ

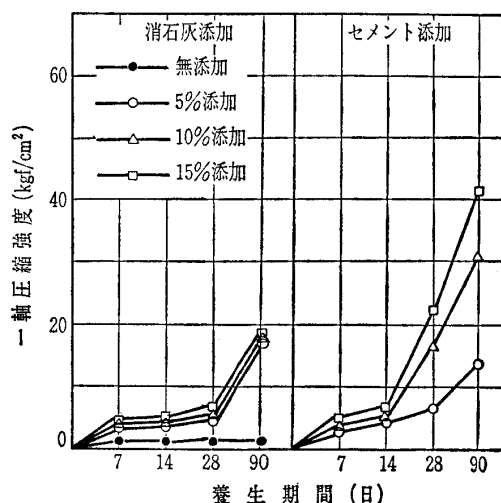


図-4 締め固めた炉底灰混合物の一軸圧縮強度

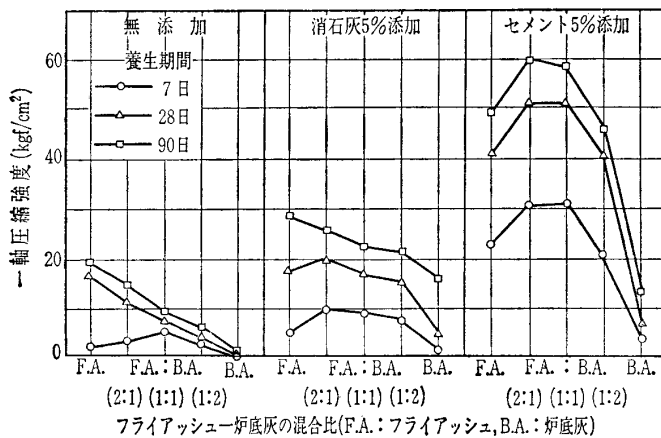


図-5 締め固めたフライアッシュ-炉底灰混合物の一軸圧縮強度

シュ粒子の表面には微量の遊離石灰 ($f\text{-CaO}$) および無水石膏 (CaSO_4) が付着しており、それらが間隙水中に溶出する過程で、フライアッシュの粒子表面にて粒子同志を結合するポズラン反応が進行する^{5), 8)}。また、消石灰およびセメントが5%添加された場合には、図-6に示す pH の測定結果 (粉末試料: 蒸留水 (1:10) の攪拌懸濁液のろ過水に対するもの) から明らかなように、長期にわたって高いアルカリの状態が維持されることから、フライアッシュのポズラン反応が促進され、無添加の場合と比較して長期材齢における強度の増大がかなり顕著になる。写真-2に示す供試体破断面の SEM 観察結果より、締め固めたフライアッシュおよびフライアッシュ-炉底灰混合物には、28日材齢においてフライアッシュの粒子表面に反応の形跡が存在しており、エトリンガイト、C-S-Hゲルおよびアルミン酸石灰水和物などの反応生成物によって粒子同志が結合されている様子が認められる。また、締め固めたフライアッシュ-炉底灰混合物の変形係数は、安定材の有無にかかわらず $E_{50} = (200 \sim 250)q_u$ 程度であり、炉底灰の混合比が大きくなるに従って変形係数が減少する傾向にある。本研究で使用したフライアッシュ (新生灰) は密封保存されたものであるため比較的大きなポズラン反応による自硬性が存在するが、灰捨て場に長期間置かれたもの (既生灰) については堆積期間中におけるポズラン反応の進行によるフライアッシュ粒子の造粒化のために、締め固め密度が大きく低下するとともに材齢の経過に伴う強度の発達がほとんど認められないことが報告されている⁹⁾。

石炭灰盛土の設地場所によっては、アルカリ性の溶出水に対する環境面での対策が必要になることがある。石炭灰中のアルカリ (主として遊離石灰から供給さ

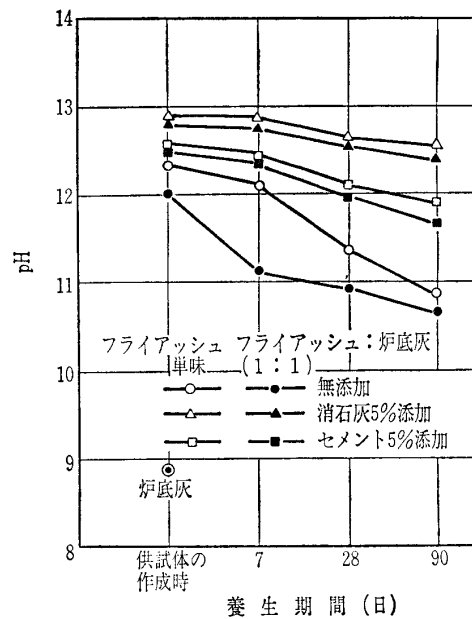


図-6 締め固めたフライアッシュ-炉底灰混合物の pH

れる) はポズラン反応の過程で徐々に消費されるために、長期的には溶出水の pH もかなり減少することが確認されている。しかし、締め固め直後の初期に水と接触する場合にはアルカリ性の高い溶出水が出ることも予想される。この対策としては、降雨などが直接盛土中に入らないような処置を行うとともに、セメントなどの添加によって早期に安定な硬化体にすることが有効である。また、有害な重金属などの溶出はほとんど認められず、路盤・盛土材料として利用する限り有害物質への特別な配慮は必要ないものと思われる。

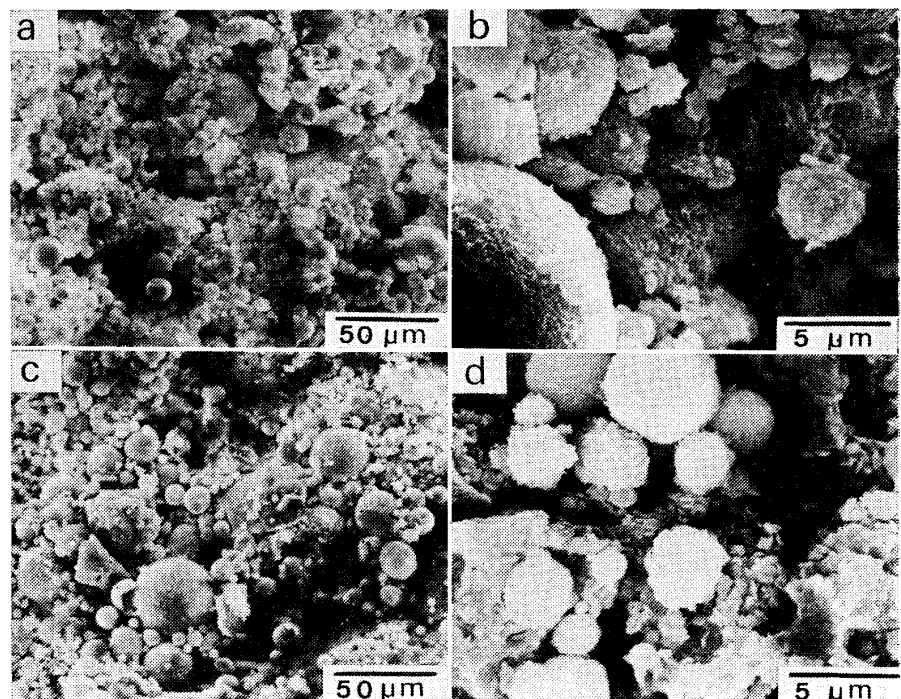


写真-2 締め固めたフライアッシュおよびフライアッシュ-炉底灰混合物の内部組織 (a, b: フライアッシュ単味, 無添加, 28日材齢, c, d: フライアッシュ-炉底灰 (1:1), 無添加, 28日材齢)

5. フライアッシュ-炉底灰混合物の水浸膨張性および水浸 CBR 値

フライアッシュ-炉底灰混合物を路盤・盛土材料として使用した場合には、雨水の侵入や地下水水位の上昇により路盤・盛土中の含水状態が変化することも予想されるので、水浸の影響について検討しておくことが必要である。締め固めたフライアッシュ-炉底灰混合物の水浸膨張量を図-7に示す。締め固めたフライアッシュを水浸させた場合には、フライアッシュ粒子の吸水により水浸直後から膨張が発生し、4日水浸における膨張量は1.5%となる。このため、表-2に示すように締め固めたフライアッシュのCBR値は水浸前に20~30%であったものが水浸後には6~10%に低下する。一方、締め固めたフライアッシュ-炉底灰混合物では、透水性が良好な炉底灰の混合比が増大するにつれて水浸膨張率が急激に減少しており、炉底灰の混合比が1/2以上になると水浸時における膨張はまったく認められない(締め固めたフライアッシュの透水係数は 10^{-5} ~ 10^{-6} cm/s程度であり、締め固めた炉底灰の透水係数は 10^{-2} ~ 10^{-3} cm/s程度である⁷⁾)。このため、締め固めたフライアッシュ-炉底灰混合物では、水浸時に膨張を示さないフライアッシュ-炉底灰(1:2)の混合比において水浸 CBR 値が130%と最大になる。また、締め固めたフライアッシュの水浸膨張性を低減する対策としては、安定材を少量添加することも有効であり、消石灰またはセメントを5%添

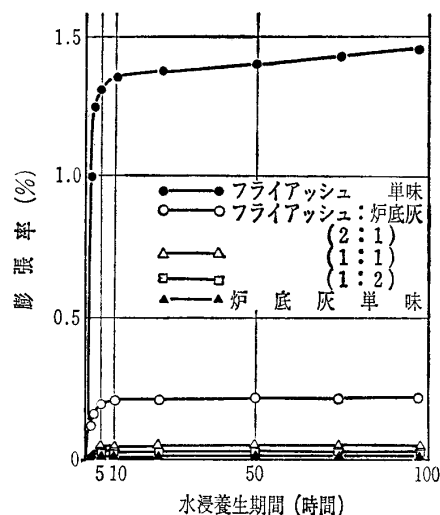


図-7 締め固めたフライアッシュ-炉底灰混合物の水浸膨張曲線

表-2 締め固めたフライアッシュ-炉底灰混合物の水浸 CBR 値 (%)

	無添加	セメント 5%添加	消石灰 5%添加
フライアッシュ単味	8	489	274
フライアッシュ-炉底灰 (2:1)	49	555	289
'' '' (1:1)	29	401	188
'' '' (1:2)	130	419	262
炉底灰 単味	66	173	87

加した場合には水浸時の膨張はゼロとなり、消石灰5%添加の場合で200~300%、セメント5%添加の場合で400~500%程度のかかなり大きな水浸 CBR 値が得られる。

6. フライアッシュ-炉底灰混合物の耐水性に及ぼす安定材の効果

フライアッシュ-炉底灰混合物の強度発現を促進し、早期に耐水性の良好な路盤・盛土として利用するためには、少量の安定材とともに締め固めることが有効である。また、フライアッシュ-炉底灰混合物を安定処理する場合には、消石灰(またはセメント)単独で処理するよりも消石灰(またはセメント)-石膏の組合せで処理した方が強度の発現が大きくなることも知られている⁵⁾。

フライアッシュ-炉底灰混合物の耐水性試験の結果を表-3および4に示す。締め固めたフライアッシュの水中浸漬強度比は安定材の種類およびその添加量と炉底灰の混合の有無により大きく相違する。すなわち、消石灰または消石灰-石膏を添加した締め固めたフライアッシュの場合、水中浸漬時点(7日材齢)での強度発現が2~3 kgf/cm²と小さいことから、添加量が少ないものについては水浸時にスレーキングにより崩壊した。しかし、消石灰または消石灰-石膏を添加した締め固めたフライアッシュ-炉底灰混合物の場合、フライアッシュと炉底灰との混合により炉底灰粒子間の構造が強化されることから、締め固めたフライアッシュと同程度の強度発現であっても水浸時にスレーキ

表-3 消石灰および消石灰-石膏を添加した締め固めたフライアッシュ-炉底灰混合物の水中浸漬強度(kgf/cm²)

安定材の種類	フライアッシュ単味	フライアッシュ-炉底灰 (1:1)
L:2.5% 5% 10%	水浸時に崩壊	12.7 (86)
	8.1 (81)	15.5 (96)
	16.8 (71)	17.3 (88)
L-G:5%, L/G=3 L/G=1	水浸時に崩壊	22.4 (88)
	水浸時に崩壊	12.7 (88)
L-G:10%, L/G=3 L/G=1	12.5 (89)	25.3 (89)
	8.6 (95)	15.4 (81)

(L:消石灰, G:石膏)

():水中浸漬強度比(%), 密封養生14日に対する密封養生7日+水中浸漬養生7日の強度の比率

表-4 セメントおよびセメント-石膏を添加した締め固めたフライアッシュ-炉底灰混合物の水中浸漬強度(kgf/cm²)

安定材の種類	フライアッシュ単味	フライアッシュ-炉底灰 (1:1)
C:2.5% 5% 10%	25.5 (83)	17.4 (99)
	37.8 (89)	47.1 (97)
	61.5 (99)	68.7 (88)
C-G:5%, C/G=3 C/G=1	29.4 (88)	41.0(103)
	19.6 (80)	28.3(111)
C-G:10%, C/G=3 C/G=1	58.6 (98)	68.5 (99)
	39.0 (98)	46.9(101)

(C:セメント, G:石膏)

No. 1876

ングを示すものではなく、水中浸漬時の耐水性が大きく改善されることが明らかになった。一方、セメントまたはセメント-石膏を添加した締め固めたフライアッシュおよびフライアッシュ-炉底灰混合物の場合、水中浸漬期間中においても顕著な強度の増加が認められ、水中浸漬強度比も80~90%以上の値が確保されていることから、セメントまたはセメント-石膏を添加した場合の水中浸漬時の耐水性はかなり良好であるといえる。良好な耐水性が得られる目安は7日材齢強度で5 kgf/cm²以上であると考えられることから、耐水性を改善する目的では初期より大きな強度が認められるセメントまたはセメント-石膏の添加が有効である。実際、フライアッシュ-炉底灰混合物を路盤・盛土材料として使用する場合には、硬化した混合物がその後の乾燥湿潤および凍結融解の繰返しによっても耐水性が低下することも予想されるので、フライアッシュ-炉底灰混合物の早期強度の確保およびその後の耐水性の増大の観点からも、安定材を少量添加して締め固めることが必要になるものと考えられる。

7. ま と め

石炭灰の路盤・盛土材料としての利用に関して、フライアッシュおよび炉底灰はそれぞれシルトおよび砂に類似した土質材料としての性質を有しているが、これらの石炭灰は比重が小さいという特徴があり、このため締め固めて作成した硬化体は比較的軽量なものになる。一方、フライアッシュは乾燥した状態では粒子の飛散が問題となるが、湿った状態では締め固めが比較的容易な材料となり、さらにフライアッシュと炉底灰とを混合することにより締め固め性状が大きく改善できる。また、締め固めたフライアッシュ-炉底灰混合物は、フライアッシュ自身に含有されている成分のポゾラン反応により材齢の経過とともに強度が増大するという自硬性を持っている。このため、初期において十分な養生が確保されると28日材齢程度で10~20 kgf/cm²

程度の圧縮強度が得られ、強化路盤・強化盛土としての機能が十分に発揮できるとともに、フライアッシュと炉底灰の混合により粒子間の構造が強化されるために水浸膨張性および耐水性も大きく改善できる。本報告では、締め固めた石炭灰の基礎的性状について取り扱っているが、石炭灰の路盤・盛土材料への利用の開発は近年活発に行われており、スラリーや気泡モルタルとして使用することによりさらに軽量化を図ったり、ジオテキスタイル工法と組み合わせることで機能を強化することなども検討されている。また、多品種の石炭の使用や石炭の燃焼方式の変更などの理由により、石炭灰の性状も変化してきており、これまで見られなかった石灰および石膏分を多く含有し、自硬性を有する石炭灰 (ASTM Class C Flyash) も徐々にではあるが我が国でも産出されるようになってきている。今後、石炭灰の品種の多様化に併せての用途開発を積極的に行うことが必要になるものと考えられる。

参 考 文 献

- 1) 玉貫 茂：石炭灰処理システムと有効利用技術，フジテクノシステム，1981.
- 2) Federal Highway Administration Offices of Research and Development: Utilization of Fly Ash and Coal Mine Refuse as Road Base Material, Proc. of the 33rd Industrial Waste Conf., pp.944~949, 1978.
- 3) DiGioia, A.M. and Nuzzo, W.L.: Fly Ash as Structural Fill, J. of ASCE, Vol.98, pp.77~98, 1972.
- 4) 五十嵐和彦：石炭灰利用の現状と展望，電力土木，No.204, pp.13~20, 1986.
- 5) 鳥居和之ほか：締め固めた石炭灰の強度と反応生成物に関する基礎的研究，土木学会論文集，No.372, pp.65~74, 1986.
- 6) 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, 1978.
- 7) 山元泰博ほか：石炭灰の物理的・工学的性質について，電力土木，No.183, pp.41~48, 1983.
- 8) Joshi, R.C. and Ward, M.A.: Cementitious Flyashes—Structural and Hydration Mechanism, Proc. of 7th Int. Congress on the Chemistry of Cement, pp.78~83, 1980.
- 9) 五十嵐和彦：石炭灰の土木材料への有効利用と展望，電力土木，No.193, pp.87~97, 1986.

(原稿受理 1988.9.12)

訂 正

本誌1月号で下記のような誤りがありましたので、ここに訂正いたしますとともにお詫び申し上げます。

記

松澤 宏・西堀高弘・杉村昌広：地盤情報としての「最新名古屋地盤図」，1月号，pp.53~58

- ◆ 54ページ，図-1 「最新名古屋地盤図」に掲載の柱状図分布の図が上下逆さまになっている。