フライアッシュセメントの特性と鉱山への適用について*

島田 英樹¹ Imam A.SADISUN² 一ノ瀬 政友³
植田 武⁴ 吉田 安廣⁵ 松井 紀久男⁶

Characteristics of Flyash Cement and Its Application in Mining

by Hideki SHIMADA^{a*}, Imam A.SADISUN^a, Masatomo ICHINOSE^a,

Takeshi UEDA^b Yasuhiro YOSHIDA^c and Kikuo MATSUI^a

a. Department of Earth Resources Engineering, Faculty of Engineering, Kyushu University,
6-10-1, Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka, 812-8581, Japan

(*Corresponding author: E-mail shimada@mine.kyushu-u.ac.jp)

b. Mitsui Matsushima Co., Ltd.

c. Sankyo Material Co., Ltd.

A large amount of flyash from the coal combustion is produced. About 55% of flyash in Japan is now utilized and the remains are dumped at disposal sites; however, the life of these sites is limited. Therefore, in this study, an effort was made to analyze the lining materials by applying flyash cement as a part of its recycle and utilization. When flyash is added to Portland cement, the same kinds of oxides as those of the cement are added. As an injection component, flyash acts, in part, as a fine aggregate which has similar function to fine debris materials of slake-prone rock and, in part, as a binding component.

From these points of view, in order to clarify to what degree the flyash content affects the properties of the lining materials, some different combinations of flyash, Portland cement and water were considered by means of several laboratory experiments, such as a fluidability test, unconfined compressive test, slaking index test and so on. Also, the utilization of flyash as backfilling materials in the mining engineering fields by means of laboratory testing and a numerical method was applied to analyzing the slake-prone rock slope stability when the mixtures are implemented as lining materials of the embankment.

KEY WORDS : Flyash Cement, Fluidability, Strength, Slaking, Application in Mining

1. はじめに

筆者らは、フライアッシュの廉価性および資源の有効利用という点に着目し、その利用拡大を目的として、ライフライン埋設工法の充填材¹⁾やダムサイトのグラウト後の空隙²⁾、シラス台地に多数存在する空洞、石炭鉱山の掘削への充填材³⁾としてのフライアッシュセメントの適用可否に関する研究を行ってきている。また、シールドトンネルや推進トンネル覆工においても、覆工背面と地山との間に空隙が生じないように施工しなければならないため、余掘りがある場合には、従来はそこに良質のズリを詰め込む方法が採られていたが、最近ではコンクリート打設時に覆工厚外までコンクリートを充填し、その後に残る空隙は覆工後にモルタル等を注入して充填されることが多くなっている。

フライアッシュセメントは、コンクリート工学の分野で既に基盤化されており、JIS規格も定められている⁴⁾。この分野における

コンクリート利用の主な目的は、コンクリート強度を可能な限り低下させずにフライアッシュセメントの流動性を向上させることに着目して研究開発が進められ、かなりの成果が得られている。しかし、フライアッシュの有効利用という観点から、鉱山やその他 JIS 規格の及ばない範囲への利用に関しては、今後十分議論する余地が残っている。このような範囲にフライアッシュセメントの利用拡大を図る場合、改めてその粘性や流動性、強度に関する基礎的な性質を把握することが必要である。

以上のような観点から、本論文ではまず、フライアッシュセメントの充填材としての種々の適用性について検討する上で必要不可欠な、フライアッシュセメント注入時の粘性および流動特性等を明確にするために、粘性試験、強度試験および土槽を用いた注入試験等を行い種々検討した。次に、フライアッシュセメントが適用可能と思われる二、三の想定例を採り上げ、その適用の有効性について検討した。

2. フライアッシュについて

微粉炭燃焼方式の石炭火力発電所では、微粉碎した石炭をボイラ内で燃焼させる。この燃焼により発生した石炭灰の粒子は高温の燃焼ガス中に浮遊して球形状となるが、これを電気集塵機で回収したものがフライアッシュと呼ばれる。フライアッシュの主成分はシリカアルミナであるため、セメントの水和反応で生成する水酸化カルシウムとポラゾン反応を起こし、長期的に密実な構造が形成される。また、フライアッシュは微細な球形粒子であった

* 2003 年 12 月 11 日受付 2004 年 3 月 12 日受理

1. 普通会員 博士(工学) 九州大学大学院助教授 工学研究院 地球資源システム工学部門

2. 九州大学大学院工学府 地球資源システム工学専攻 博士後期課程

3. 普通会員 工博 九州大学大学院助手 工学研究院 地球資源システム工学部門

4. 普通会員 三井物産(株) 燃料・エネルギー事業部 資源開発部

5. 三協マテリアル(株) 代表取締役社長

6. 普通会員 工博 九州大学大学院教授 工学研究院 地球資源システム工学部門

[著者連絡先] FAX 092-642-3614 (九大・工・地球資源)

E-mail : shimada@mine.kyushu-u.ac.jp

キーワード : フライアッシュセメント, 流動性, 強度, スレーキング, 鉱山への適用性

め、フライアッシュを混合したコンクリートやモルタルは流動性が増大する。さらに、粒径は 0.1mm 以下が 90% 以上を占めており、化学的性質が砂とほぼ同様であるため締固めの性能が高い⁵⁾。

フライアッシュは現在、主にセメントコンクリート分野、土木・建設分野、農林・水産分野等に利用されている。フライアッシュとセメントを混合させたフライアッシュセメントは土木の各分野における構造物に広く用いられている。特に、ダム、橋梁橋脚、各種発電所等の大型構造物には、水和熱の低減、水密性の増大、アルカリ骨材反応の抑制、膨張収縮作用の抑制等の特性を生かして、ダムコンクリートをはじめ、トンネルコンクリート、海洋コンクリート、プレキャストコンクリート、グラウトコンクリート、高流動コンクリート、水中不分離性コンクリート等に利用されている⁴⁾。その他に、道路のアスファルトフィラー材、路盤材、路床材、盛土材、セメントコンクリート舗装材、舗石材等の道路材料、地盤安定材、排水改良材、地盤舗装材、以下に述べる充填材としても利用されている。

前述したように、シールドトンネルや推進トンネルの覆工では覆工背面と地山との間に空隙が生じないように施工しなければならないため、最近では余掘りがある場合には、コンクリート打設時に覆工厚外までコンクリートを充填し、その後に残る空隙は覆工後にモルタル等を注入して充填されることが多くなっている。また、鉱山の払跡等への充填についても今後積極的に検討されるべきである。

このような充填作業に関して、注入される充填材の具備すべき主な条件は、ポンプで容易に圧送でき、注入後充填箇所から周辺地山に流出せずに周辺地山程度の強度が発揮されること等である。したがって、この具備すべき条件の検証には、フライアッシュセメントの粘性や流動性、強度等を把握することが必要である。

3. フライアッシュセメントを用いた各種試験

3・1 フライアッシュセメントの粘性・ブリージング試験

JIS 規格では、コンクリートの打設に適したフライアッシュセメントの粘性やブリージング特性についての制限は設けているが、フライアッシュセメントを充填材として適用する場合に関する指針については未だ不十分のようである。すなわち、フライアッシュセメントのフライアッシュ配合重量が 30% 以下のブリージング特性、コンクリートの軟らかさを表すスランプ特性、流動性を表すスランプフロー特性に関する品質管理制限⁴⁾は存在するが、JIS 規格外のフライアッシュ配合重量を有するフライアッシュセメントのブリージング特性、粘性、流動性に関する情報は少ない。したがって、フライアッシュセメントの圧送特性や分離特性等の基礎的資料を得るためには、これら各種の試験を行う必要がある。

そこでまず、フライアッシュセメントの圧送特性および分離特性を把握するために、フライアッシュセメントを用いた粘性およびブリージング試験を行った。粘性試験は B 型粘度計を用い、B 型粘度計のローターに作用するせん断応力を粘性の大小を表すパラメータとした。ブリージング試験では、1 リットルのメスシリンダーに高さ 30cm までフライアッシュセメントを入れ、時間の経過によってセメントと水の分離高さを測定した。なお、JIS 規格では加圧ブリージング試験⁴⁾による値を用いて評価されるが、現場で試験に供するためには、簡易な方法を適用した方が便利であると考えこの手法を用いた。また、試験に用いたセメント：フライアッシュ：水の重量配合比は、10：0：5、8：2：5、5：5：5、3：7：5 および 1：9：5 の 5 種類である。

Table 1 にセメント：フライアッシュ：水の重量配合比と粘性の関係を示す。なお、表中の粘性は、ローターの回転数が 30rpm の

ときの値である。この表より、フライアッシュの混合比率の上昇に伴い、フライアッシュセメントの粘性が大きく低下していることが分かる。これは、フライアッシュの粒径がセメント以上に細かく、その粉末度はおおそ 3,500 ~ 5,000cm²/g の範囲であり、かつ個々の粒子は熔融され、ガラス化し、表面が滑らかな球状となっているため、フライアッシュの粒子がスラリー中でボールベアリングのような働きをするためと考えられる。このことから、フライアッシュの混合比を増加させることにより、フライアッシュセメントの流動性が大きく向上し、圧送特性の改善が図れることが分かる。また、この結果はフライアッシュの混合比を大きくすることにより、少ない水量でも流動性のよいフライアッシュセメントが得られることを示唆しており、単位水量を抑えることができるとともに、実質的にブリージングを減少させることができると考えられる。

Fig.1 にセメント：フライアッシュ：水の重量配合比 10：0：5、5：5：5 および 3：7：5 における時間の経過とセメント・水の分離高さを示す。この図より、フライアッシュの混合比の増加に伴い、初期におけるブリージング現象が抑制されていることが分かる。これは、フライアッシュの粒径がセメントの粒径に比べて小さいために沈降速度が遅く、セメント粒子の沈降がフライアッシュによって抑制されたためと考えられる。このことから、今回の試験条件内ではフライアッシュの混合比を大きくすることにより、ポンプ圧送特性を改善できることが分かる。

3・2 フライアッシュセメントの流動試験

次に、フライアッシュセメントを直接土壌に流入させることが可能か否かという観点に立ち、土槽を用いたフライアッシュセメントの注入試験、および比較のために、ダムグラウト等で一般的に用いられる充填材のポルトランドセメント単独の注入試験を行った。Fig.2 に今回使用した注入試験装置の概略図を示す。本試験装置は、主に所定のセメント水比の充填材を作製する水槽、攪拌機、上部タンク、今回注入の対象としているマサ土試料を詰め込む円筒形セル（ステンレス製、内径 5.2cm、長さ 69cm）、マノメータの 5 つの部分から構成されている。試験は、まず所定の水セメント比の充填材を水槽で作製し、ポンプにより上部タンクに送る。作製した充填材は静置しておくことでブリージング現象が発生するため、常に攪拌機で攪拌して水槽内で水セメント比が均一になるようにしている。上部タンクに送られた充填材は、タンク内で水面の高さを一定に保ちながらセル内に流入し、セル内を通過してセル下部より水槽に戻される。充填材は、セル内のマサ土中を通過するときにマサ土粒子の表面に付着してセル内の間隙を充

Table 1 Apparent viscosity of the mixtures.

Cement:Flyah:Water (wt %)	10:0:5	8:2:5	5:5:5	3:7:5	1:9:5
Apparent Viscosity (mPa.s)	1373	1130	838	733	496

Fig. 1 The relation between the elapsed time and the height of interface between the clear water and denser suspension.

填していくため、セル下部からの流量は時間の経過とともに減少する。そこで、所定の時間間隔でセルに設置しているマンメータの値とセル下部より流出してくる流量をメスシリンダーにより計量し、充填材による充填状態を見る。なお、本試験に用いたマサ土の粒径は1.70～4.75mm、充填材の重量配合比はフライアッシュセメントがセメント：フライアッシュ：水＝3：7：5、ポルトランドセメント単独がセメント：水＝10：5である。また、セルの入口と出口における水頭差 $\Delta h=106\text{cm}$ とし、動水勾配 $i=\Delta h/L=1.54$ (L ：セル長さ)である。なお、マンメータ No.2～No.10 はセル上部のマサ土表面から各々 50, 55, 60, 70, 80, 90, 110, 130, 150 mm の位置に、マンメータ No.1 および No.11 は、それぞれセル上部およびセル下部に設置した。

充填材の注入後の経過時間と流量変化の関係を Fig.3 に示す。この図の縦軸は、各時刻における流量 q を充填材注入前に行った透水試験の流量 q_0 で正規化した q/q_0 で示している。この図より、流量は時間経過とともに減少し、また、ポルトランドセメント単独の方が短時間で流入が停止していることが分かる。Fig.4(a), (b) には、注入後経過時間とポルトランドセメント単独とフライアッシュセメントにおける各マンメータの水頭を示している。これらの図より、フライアッシュセメントを用いた場合は、マサ土内各マンメータの水頭が注入開始後ほぼ一定の値を示し、注入開始後 100 分程度から減少することが分かる。一方、ポルトランドセメントを用いた場合、マサ土内各マンメータの水頭が急激に低下している。これらは、先述のようにフライアッシュセメントは粘性が小さく、一方ポルトランドセメントは粒子が溶液中に団粒状態で存在していると推測されるためである。すなわち、フライアッシュセメントでは、注入開始直後からセル下部からのセメント粒子の流出が認められ、セメント成分はマサ土試料を短時間で通過

し、その途中で間隙を徐々に埋めていくものと考えられる。一方、ポルトランドセメントは注入開始直後からマサ土試料表面付近でセメント成分が堆積し、短時間で流出が停止することに起因すると予想される。以上のことから、フライアッシュセメントを充填材として用いると周辺地山に対して効果的に充填されるため、ポルトランドセメントよりも有効であると考えられる。

3・3 フライアッシュセメントの強度試験

JIS 規格において、フライアッシュセメントが要する一軸圧縮強度は、A 種 (セメントに対するフライアッシュ混合重量 5～10%) で 42.5MPa 以上、B 種 (混合重量 10～20%) で 37.5MPa 以上、C 種 (混合重量 20～30%) で 32.5MPa 以上であると規定されている⁴⁾。しかし、鉱山をはじめとする現場への適用に関して論ずる場合、土壌程度の強度を有すれば十分であり、このような高強度のフライアッシュセメントを用いる必要はない。

そこで、フライアッシュの配合量を増大させた場合の強度特性を把握するために、養生日数をパラメータとした一軸圧縮試験を実施した。供試体のセメント：フライアッシュ：水の重量配合比は、10：0：5, 8：2：5, 5：5：5, 3：7：5 および 1：9：5 の 5 種類とした。また、供試体はモールドにより直径 50mm、高さ 100mm で作製し、その養生日数は 3, 7, 14, 28 日とした。

Fig.5(a), (b) に養生日数と一軸圧縮強度ならびに 50% 強度における接線ヤング率の関係を示す。この図より、セメントの割合が増大すると当然のことながら強度、耐変形性も大きくなっている。セメントとフライアッシュの配合量と強度ならびに変形性について見てみると、フライアッシュの配合量が増大するほど、強度ならびに耐変形性が小さくなる。特にフライアッシュの配合量が 9 割になると、セメントのみの場合の 15% 程度にまで低減する。また、セメントのみの場合は養生後 7 日程度で 28 日強度の 50% 程

Fig. 2 Injection test devices.

Fig. 3 Relationship between the elapsed time after the injection and the discharge of the grouting material.

Fig. 4 Relationship between the elapsed time and the water head inside the cell.

Fig. 5 The relation between the curing time and the mechanical properties.

Table 2 Thermal properties of typical grout injection materials.

	Specific gravity	Thermal conductivity	Thermal diffusivity	Total calorific power	Specific heat	Temperature increase	Cement weight per unit volume
Unit	kg/m ³	kJ/mh°C	10 ⁻³ m ² /h	kJ/°C	kJ/kg°C	°C	kg/m ³
Flyash cement	1,500	4.19	1.00	41.9	2.79	15.0	130
Air entraining cement	1,000	3.14	0.775	167.4	4.05	41.3	300
Portland cement	1,700	4.60	1.10	251.2	2.466	102.0	750

度まで発揮するが、フライアッシュの配合量が增大するにつれて、50%強度程度になる日数が増大する。したがって、フライアッシュを混合することにより、強度、耐変形性ともに減少し、強度、耐変形性を発揮するためにはかなりの養生日数が必要になることが分かる。しかし、地表近くの空洞にフライアッシュセメントを充填するような場合は、土壌程度の強度を発揮すればよいことや、流動性に優れることを併せて考えると、十分利用できると思われる。

以上のことから、フライアッシュを混合することにより強度は低下するが、要求される強度に応じてセメントにフライアッシュを混合すれば、フライアッシュセメントを有効に利用できることが判る。

3・4 フライアッシュセメント充填後の温度上昇

空洞への充填材の注入時には、充填材内部の温度上昇に伴う充填材の熱応力によるひび割れあるいは充填材の熱劣化についても考慮しなければならない。そこで、セメント系の充填材として一般的に用いられるエアモルタル、セメントーベントナイト系の充填材ならびにフライアッシュセメントの発熱量推定値を求めた。Table 2 に 3 種類の充填材の熱特性値を示す。この表より、フライアッシュセメントは、エアモルタルよりも熱伝導率、熱拡散率とも大きいので、充填後の温度上昇が小さいということが推定される。また、フライアッシュセメントは前述のようにセメントの一部代替としてフライアッシュを用いるため、単位セメント量はエアモルタルの 1/3 程度である。このため、積算発熱量は表に示すように 1/4 程度となり、積算発熱量を比熱で除した充填後の温度上昇推定量も小さくなることが判る。さらに、フライアッシュセメント充填前の温度が 16.1°C であったものが充填 60 時間後の充填材中心部の最高温度が 36.1°C 程度であったという現場計測結果⁶⁾からも判断すると、フライアッシュセメントを用いることにより、充填後の温度上昇量も抑制され、上述の問題も低減できると思われる。

4. フライアッシュセメントの鉱山への適用

4・1 採掘空洞へのフライアッシュセメントの充填

採掘空洞を充填することは、坑内掘り鉱山においては別に目新しいことではなく、特に金属鉱山では採掘作業の安全性を高め、

Fig. 6 Specimen model.

鉱物資源の採掘実収率の増大を図り、採掘後の空洞の安定性を確保するために古くから用いられてきた。坑内掘りと露天掘りの中間的採掘法に位置付けられるハイウォールマイニングでは、採掘空洞とハイウォールの安定性を確保するために必要な幅のピラーを残す必要がある。実際のハイウォールマイニングでは採炭実収率を高めるために、トレンチマイニング、スロットマイニングやパンチマイニングなどの方式が提案されているが^{7,8)}、実際の実収率はピラーを残すために 50 ~ 60% と依然として小さく、相当量の石炭がピラーとして未採掘のまま残されている。このような現況は、採掘空洞を充填することによりかなり改善されると考えられるため、簡単なピラーモデルを用いて空洞充填によるピラー強度の増加効果を室内試験により調べた。

モデルピラーには相浦砂岩を用い、ピラーは直径 25mm、長さ 60mm の円柱形とした。モデルピラーは Fig.6 に示すように、外径 90mm、高さ 50mm の塩ビパイプの中央にセットされ、その周りを充填材で一定の高さまで充填される。充填高さについては、現場においては完全に天井まで空洞を充填できない場合が多いことを考慮し、3 種の充填高さ (25, 40, 50mm) で実験を行った。なお、使用した充填材はセメント : フライアッシュ : 水 = 5 : 5 : 5, 3 : 7 : 5, 1 : 9 : 5 の 3 種である。

Fig.7 と Fig.8 には、それぞれの充填高さと配合割合を変化させた場合の一軸圧縮試験により得られた応力-ひずみ曲線を示す。この試験は 28 日間の水中養生後に行ったものである。なお、モデル

Fig. 7 Stress-strain curve (Height of backfill=50mm).

Fig. 8 Stress-strain curve (C:F:W=1:9:5).

ピラーのみの試験は、すなわちピラーに相当する相浦砂岩を完全含水飽和状態にして、一軸圧縮試験により得られた結果を用いている。まず、Fig.7の結果より、フライアッシュをセメント重量の50%代替混合したフライアッシュセメントを用いても、ピラーの強度は2倍弱改善されることが分かる。また、90%ものフライアッシュを混合しても約1.5倍もの改善が認められる。また、Fig.8より、90%混合フライアッシュセメントを、ピラー高さの半分程度充填しても強度特性の改善が認められる。これは、フライアッシュを大量に含んだセメントを払跡内に半分程度充填すれば効果を発揮することを意味しており、フライアッシュの大量消費という観点からも有意義であると思われる。

以上のことから、ハイウォールマイニング払跡にフライアッシュセメントの充填を行うことによりピラーの強度特性は大きく改善され、このシステムを導入することにより、回収率や作業安全性の向上が図れると考える。さらに、強度の大きな充填材でピラーを完全に充填材で拘束する必要がある場合には、フライアッシュ代替混合量を小さくすることにより、大きな効果を期待することができる。

4・2 スレーキング性岩石に対するスレーキングの抑制

露天掘り石炭鉱山において、夾炭層岩石（ずり）がスレーキング性を有する場合、リハビリテーションの際に種々の工夫が必要となる。そのひとつに、スレーキング性岩石のずりをフライアッシュとセメントの混合材料に骨材として利用できれば、ずりの適正な処理や資源の再利用という観点から有用であると考えられる。そこで、スレーキング性岩石を骨材としたフライアッシュセメントを用いるという手法で、スレーキング性の抑制効果を検討した。

4・2・1 スレーキング・インデックス試験 スレーキングを評価する試験方法としては、Franklin と Chandra⁹⁾によって提案された動的スレーキング試験が挙げられる。この試験は、ISRMによって既に標準化され一般的に用いられている¹⁰⁾。しかしながら、この試験は供試体にドラムの回転力や衝撃力を与える動的な試験であるため、その試験値の取り扱いには若干の問題点を含む。したがって、降雨によるスレーキングなどを取り扱う場合には、より現場条件に近い手法によるスレーキング性の評価が必要であり、このような問題について対処できるスレーキング方法のひとつ

Fig. 9 Schematic diagram of slaking index test.

Table 3 Class value and classification obtained from single cycle of slaking index test.

Class	Slaking Index (%)	Classification
1	0 - 5	Very low
2	5 - 10	Low
3	10 - 25	Medium
4	25 - 50	High
5	50 - 75	Very high
6	75 - 100	Extremely high

つにスレーキング・インデックス試験が挙げられる。そこで、スレーキング・インデックス試験によるフライアッシュセメントとスレーキング性岩石の混合材料の評価を行った。

Fig.9にスレーキング・インデックス試験方法の概略を示す。スレーキング・インデックス試験では、岩石試料として100～150g程度の岩石片が6個準備され、それぞれ別のビーカーに入れられる。ここで、ビーカーの総質量Bが予め計測される。これらの試料を105℃で3日間乾燥させた後、室温で冷却される。冷却後に6個のビーカーとその中に入れられている試料の総質量 W_x が計測された後、それぞれ蒸留水で満たされたビーカーに浸され24時間放置される。ここで、ビーカーには試料から10mm以上の高さになるまで蒸留水が入れられる。24時間静置された試料は、蒸留水中で網目2mmの篩で篩われた後、その網上産物がビーカーに戻され、さらに105℃で3日間乾燥させた後、室温で冷却される。冷却後に再び6個のビーカーとその中に入れられている試料の総質量 W_x' が計測される。このサイクルを1回とし、最大5回までのサイクルが繰り返される。

岩石のスレーキング性を評価するパラメータであるスレーキング・インデックス I_s は、試験前の乾燥重量からの重量損失を百分率で表したものであり、下式より求められる。

$$I_s = \frac{W_x - W_x'}{W_x - B} \times 100(\%) \quad \dots\dots\dots (1)$$

これまでの研究¹¹⁾より、1回のサイクルで得られるスレーキング・インデックスと動的スレーキング試験や簡易スレーキング試験結果¹²⁾との比較から、Table 3のようにスレーキング・インデックスを用いて岩石のスレーキング性を分類している。また、本試験方法では、サイクルが増大するとともにスレーキング・インデックスが増加することは自明であるが、その増加率の相違によってもスレーキングの特性が判断できる。

4・2・2 スレーキング性岩石を骨材としたフライアッシュセメントの特性 Fig.10に今回用いた岩石試料のスレーキング・イ

Fig. 10 Relationship between the number of cycle and the slaking index.

Table 4 The cement-flyash-water proportion of the mixtures.

Specimen#	Portland Cement (wt %)	Flyash (wt %)	Rock Fragment (wt %)	WSR*
CFR1	2	48	50	0.35
CFR2	4	46	50	0.35
CFR3	6	44	50	0.35
CFR4	8	42	50	0.35
CFR5	10	40	50	0.35

* Water to total solid (cement + flyash + rock) ratio

ンデックス試験の結果を記す。この図より、1回のサイクルで得られたスレーキング・インデックスより、オンピリン炭鉱のシルト岩 (OM-SI) およびタンジュンエニム炭鉱の粘土岩 (TE-CI) は中程度のスレーキング性を有する。一方、タンジュンエニム炭鉱の泥岩 (TE-Md) は、他の2つの試料よりもスレーキングし難いことが分かる。しかし、5回のサイクル試験結果をもとにスレーキング性を見てみると、タンジュンエニム炭鉱の両試料、特に泥岩は、オンピリン炭鉱からのそれと比べて、サイクル数が増大するにつれてスレーキング性が加速していることが分かる。したがって、タンジュンエニム炭鉱の岩石試料は、いったん含水するとスレーキング性を抑制し難いということが分かる。このことは、これらの岩種で形成される岩盤斜面が降雨に対して浸食され易いことを意味し、また、これらの岩種で構築されるずり山が造成されると、その斜面の浸食に伴う崩壊現象が想定される。

そこで、スレーキング性を有する岩石を破碎設備で破碎し、これをフライアッシュセメントと混合・固結化するという手法で、この岩石のスレーキング性の抑制効果を検討した。

実験は、Table 4 に示すような重量配合比で配合した供試体を作製し、前述のスレーキング・インデックス試験に供した。なお、岩石は 10mm 以下に破碎したタンジュンエニム炭鉱の粘土岩を用いている。この際、水に対する溶質部分の割合は 0.35 一定とし、溶質部分の中の岩石の割合も 50% 一定とした。供試体の作製には直径 50mm、高さ 100mm のモールドを用い、28 日間自然乾燥させた後、試験に供した。

Fig.11 にはセメント重量配合率とスレーキング・インデックスの関係を示す。図中の数値はフライアッシュの重量配合率である。この図より、セメントの配合率が増大するとともに、スレーキング性が小さくなっていることが分かる。Sadisun ら¹³⁾ は、スレーキング・インデックスが 10% 以下になると、スレーキングによる岩盤斜面の浸食が抑制されるという結果を報告している。この報告と今回の実験結果を併せて判断すると、セメントを溶質全体の 8% 添加するだけでスレーキング・インデックスが 10% 以下になるため、少量のセメントを添加するだけでもスレーキング性を抑制できること、同時に溶質全体の 42% もの量のフライアッシュを

Fig. 11 Relation between content of cement and slaking index.

Fig. 12 Waste rock embankment construction with a lining technique.

用いてもよいことが分かる。したがって、このような用途にフライアッシュが利用できれば、フライアッシュを大量に消費でき、かつスレーキング性を有する岩石（ずり）の適切な処分もできることが示唆される。

4・3 フライアッシュセメントのスレーキング性岩盤斜面へのライニング材としての適用

インドネシアの石炭鉱山のほとんどは露天掘りで採掘している。この際、石炭の採掘を行うためにまず剥土されるが、その剥土は採炭切羽近くのずり置き場に運搬される。ずり置き場（以下、ずり堆積場と呼ぶ）は、一般に石灰石鉱山のベンチのような形状に設計されるが、このベンチ斜面の安定性が確保できるように、剥土の岩種や力学的、化学的特性によりベンチ内の配置やベンチ高さなどが決定される。これらの剥土は、一般に粘土岩や頁岩、シルト岩などのスレーキング性を有する夾炭層岩石であるため、ずり堆積場の斜面ではスレーキングによる細屑化と浸食・崩壊現象が頻繁に認められる。また、これらの夾炭層岩石は黄鉄鉱をかなり含有しているため、これに伴う酸性水が発生し、周辺の生態系などに影響を及ぼす等の環境問題も生じている¹⁴⁾。そこで、ずり堆積場斜面のスレーキングの発生や酸性水の発生を抑制するために、フライアッシュセメントを斜面のライニング材として施工することで、これらの問題に対処できるのではないかと考えた。

Fig.12 にインドネシアの KPC 炭鉱のずり堆積場の概要¹⁵⁾を示す。KPC 炭鉱では、黄鉄鉱を多く含む剥土が存在するため、これをずり堆積場の下方に、その上部にはこれの少ない剥土が配置される。また、ずり堆積場の表面近くにライニング材が散布され、雨水等による浸食対策が施されている。なお、KPC 炭鉱では、セメント・ベントナイト系のライニング材が用いられている。そこで、KPC 炭鉱におけるずり堆積場のライニング方法を例に採り、ライニング材としてフライアッシュセメントを用いた場合のずり堆積場斜面の安定性の確保について、数値解析により検討した。

Fig.13 に解析モデルを示す。これは、上述の KPC 炭鉱で試行さ

Fig. 13 Dimensions of the finite element models used.

Fig. 14 Numerical modeling of four stages of waste embankment.

れたライニング手法を参考にモデル化したものである。解析には有限要素法の解析ソフト Phase² を用いた。ずり堆積場には、剥土岩石の種類を考慮して、Fig.14 に示すように 4 段階で剥土を堆積させると仮定している。なお、側圧係数 1 とし、破壊基準にはモール・クーロンの直線破壊基準を用いた。また、安全率は各要素におけるせん断応力をモール・クーロンの破壊基準で規定されるせん断強度で除した値である。Table 5 に解析に用いた力学的特性を示す。

Fig.15 にライニングの有無によるずり堆積場における安全率について示す。これらの図より、ライニングの有無により斜面の安全率に顕著な相違が認められる。すなわち、ライニングを施した場合には、施さない場合に比して堆積場斜面から奥部にかけて安全率が向上し、変形量も抑制されることが分かる。また前節で述べたように、フライアッシュセメントを用いてスレーキング性岩石の処理を行った上でずり堆積場に堆積すれば、ずりのスレーキングそのものも抑制することが可能であることから、さらなる効果が期待できる。

5. ま と め

本報告では、フライアッシュの利用拡大を目指して、フライアッシュセメントの適用例や諸性質について述べ、またフライアッシュセメントが適用可能と思われる二、三の想定例を採り上げ、その適用の有用性について述べた。

まず、フライアッシュセメント注入時の粘性および流動特性等を明確にするために、粘性試験、強度試験および土槽を用いた注入試験を行った結果、フライアッシュセメントは、ポルトランドセメントに比して、粘性、ブリージング性、流動性に優れていることが明らかになった。また、強度に関しては、フライアッシュを混合することにより低下するが、要求される強度に応じてセメントにフライアッシュを混合すればフライアッシュセメントを有効利用できることが分かった。さらに、充填後の温度上昇もフライアッシュセメントを用いることにより抑制できることも示した。

次に、採掘空洞へのフライアッシュセメントの充填に効果があること、さらにスレーキング性岩石の処理材料やずり堆積場斜面の安定性確保へのライニング材料として、フライアッシュセメントの有効利用の妥当性について示した。

謝辞 本研究を遂行するに当たり、多大なるご協力を賜った当

Fig. 15 Computed safety factor of the model:
without lining material (left), with lining material (right).

Table 5. Gemenical parameters for each studied material.

Material Type	UCS (MPa)	Young's Modulus (MPa)	Poisson's Ratio	Unit Weight (kN/m ³)	Cohesion (MPa)	Friction Angle (deg)
Base Materials	1.068	282	0.30	21.7	0.348	23.8
Slake-prone rocks	0.752	154	0.32	19.4	0.301	12.6
Slake-prone and potentially acid forming rocks	0.820	184	0.31	20.1	0.312	15.4
Mixtures*	4.275	2921	0.24	26.5	0.972	41.1

* obtained from the CRF5 mixture specimen.

部門技官・藤田修一氏ならびにウエストバージニア大学訪問研究員・笹岡孝司博士に深甚なる感謝の意を表す。なお、本研究の一部は、平成 11 ～ 12 年度科学研究費補助金・基盤研究 (C) (課題番号 11650960) および平成 15 ～ 16 年度科学研究費補助金・若手研究 (B) (課題番号 15760611) により行われたことを付記し、謝意を表す。

References

- 1) H.Shimada,T.Sasaoka,S.Kubota,K.Matsui and Y.Yoshida : Proc.of 12th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection, (2003), pp.199-204.
- 2) M.Koga, H.Shimada and K.Matsui: Shigen-to-Sozai, **116**(2001), 209-214.
- 3) K.Matsui, H. Shimada, T.Sasaoka and A.Yabuki: Proc. of the 11th Japan Sympo. on Rock Mechanics, (2002), K02 (CD-ROM).
- 4) Japan Flyash Association : Coal Ash Handbook 2nd Edition, (1995).
- 5) Agency for Natural Resources and Energy: Coal Note, (2002).
- 6) Society for FF21 Technology: Pamphlet on FF21 Technology, (2003).
- 7) L.G.Boyd, : *Trench and slot mining*, Paper presented at IBC Conferences, (Brisbane, Australia, 1998), p.6.
- 8) Private Communication: Archveyor Mining Services, (1999).
- 9) J.A.Flanklin and R.Chandra: Int.J.Rock.Mech.Min.Sci. and Geomech. Abstr., **9**(1972), 325-341.
- 10) ISRM: *Rock Characterization Testing & Monitoring, ISRM Suggested Methods*, (1981), p.211.
- 11) I.A.Sadisun, H.Shimada, M.Ichinose and K.Matsui : Proc.of the 11th Japan Sympo. on Rock Mechanics, (2002), E01(CD-ROM).
- 12) M.Ichinose and K.Matsui: Tsuchi-to-Kiso, **375**(1989), 43-47.
- 13) I.A.Sadisun, H.Shimada, M.Ichinose and K.Matsui: Proc. of the 3rd Int. Conference on Recent Advances in Materials, Minerals and Environment, Vol. Environment, (2003), pp.128-134.
- 14) K.Matsui, T.Ueda, H.Shimada, A.Yabuki, I.A.Sadisun and S.Kramadibrata: Proc. of 7th Int.Conference on Environment and Mineral Processing, **2**(2003), 203-208.
- 15) I.A.Sadisun, Bandono, H.Shimada, M.Ichinose and K.Matsui: Proc.of the 12th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, **1**(2003), 747-750.