

フライアッシュセメントの充填材としての適用性

APPLICATION OF FILLING MATERIALS FOR FLYASH CEMENT

島田英樹*・笹岡孝司**・久保田士郎***・松井紀久男****

Hideki SHIMADA, Takashi SASAOKA, Shiro KUBOTA and Kikuo MATSUI

A large amount of wastes from the preparation plant is produced. The properties of these wastes vary depending on the mineralogical contents of the mother rock in which the coal is embedded. The waste quality depends on the method of mining and cleaning. The waste mainly consists of clays, quartz, carbonaceous materials, mica, pyrites and so on. About 55% of coal-ash is now utilized and the remains are disposed of at the disposal sites, however, the life of the disposal site is limited. Moreover, it is difficult to find new disposal sites. Therefore, it is requested that the percentage of the utilization of the coal-ash be increased in every field in Japan. So, it is very much available if the injection material for natural/artificial openings can be applied on the cement that is added to flyash.

Among the man-made pozzolans, a flyash is probably the most successful component used in grout injection. When flyash is added to portland cement concrete, the same kinds of oxides as those of the cement are being added. As an injection component, flyash acts, in part, as a fine aggregate and, in part, as a binding component. However, there is not a substantial alteration of the properties of the original component.

From these points of view, in order to clarify to what degree the flyash content affects the properties of the injected grout mixture, different combinations of flyash, portland cement and water were considered by means of several experiments.

Key Words : flyash cement, filling material, fluidability, viscosity, uniaxial compressive strength

1. はじめに

トンネル覆工では、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。このため、余掘りがある場合には、そこに良質のズリを詰め込む方法もあるが、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。このような充填作業に関して、筆者らはフライアッシュの利用拡大を目的として、泥濃式推進工法の充填材¹⁾やダムサイトのグラウト後の空隙²⁾やシラス台地に多数存在する空洞、石炭鉱山の払跡への充填材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た。また、推進工法のひとつである泥濃式推進工法では、施工終了時には裏込め注入としてセメント注入が実施されるが、余掘り部には既に泥水が注入されているため、泥水をセメント系注入材に置き換える必要がある。そこで、安価および資源の有効利用という観点から、フライアッシュセメントによる裏込め注入が試みられているが、その際必要となるフライアッシュセメントの粘性や流動性に関する基礎的な資料を把握することが必要である。以上のような観点から、本報告では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結果について述べる。

* 正会員 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

** 非会員 九州大学大学院工学府 地球資源システム工学専攻

*** 非会員 博士(工学) 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

**** 正会員 工学博士 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

2. フライアッシュ・クリンカアッシュについて

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粒子となるが、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、ボイラ内の燃焼によって生じた石炭灰の粒子が熔解して相互に凝集しボイラ底部の水槽に落下堆積したものはクリンカ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ボ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粒子で球形をしているため、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。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。一方、クリンカアッシュは、赤熱状態でボイラ底部の水槽に落下した石炭灰を破砕機で粉碎したものであり、赤熱状態から急冷水洗しているため化学的に安定している。クリンカアッシュの粒子は、砂礫と粗砂を中心とした締固め性能の高い砂と類似した粒度分布を有するため、透水係数も砂と同程度で高い排水性があり、表面に多数の細孔があるため水分保有率が一般土壌と比して高いという特徴がある⁴⁾。

加圧流動床燃焼方式の場合には、生石灰と同様な性質を有するBMアッシュ(Bed Material Ash)と粒子が不定形で硬化反応しやすいPFBCアッシュ(Pressurized Fluidized Bed Combustion Ash)が発生する。

表-1にフライアッシュの利用技術の分類、表-2にフライアッシュの利用状況を示す。この表より、フライアッシュは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ことが分かる。特に、フライアッシュをセメントと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、膨張収縮が小さい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、プレバッドコンクリート、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⁵⁾。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、次章で述べる充填材としても利用されている。

表-1 フライアッシュの利用技術の分類

○セメント・コンクリート分野 セメント製造用原料、セメント混和材、 フライアッシュセメント、コンクリート混和材
○土木・建設分野 道路材(アスファルトフィラー材、下層路盤材 凍土抑制層、軽量砂) 盛土・埋立材(陸上埋立、不拡散高密度埋立、 コンクリートダム打設) 建築材・人工骨材(ALC、バルブセメント板、 人工軽量骨材) トンネル等の充填材、橋脚海中基礎
○農林・水産分野 普通肥料、特殊肥料、土壌改良材、人工床土、 海洋構造物(漁礁等)
○その他の分野 排煙脱硫材、人工ゼオライト、高分子材料等

表-2 フライアッシュの利用状況(1999年度)

産出量(千トン)		利用量(千トン)		
フライ アッシュ	ボトム アッシュ	セメント原 料	セメント混 和材	コンクリート 混和材
3,659	472	1,178	224	118
利用量(千トン)				
軽量骨材	レンガ セラミックス	アスファルト フィラー	盛土 埋戻材	道路用材
76	73	2	33	12
利用量(千トン)			利用率(%)	
旧坑埋戻材	その他	計	52.1	
154	283	2,153		

3. フライアッシュセメントの充填材への適用について

トンネル覆工では、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、前述したように、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。

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。

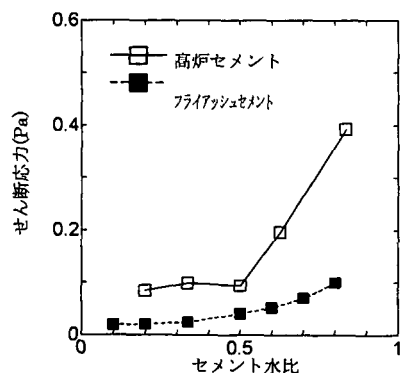
4. フライアッシュセメントを用いた各種試験

(1) フライアッシュセメントの粘性・ブリージング試験

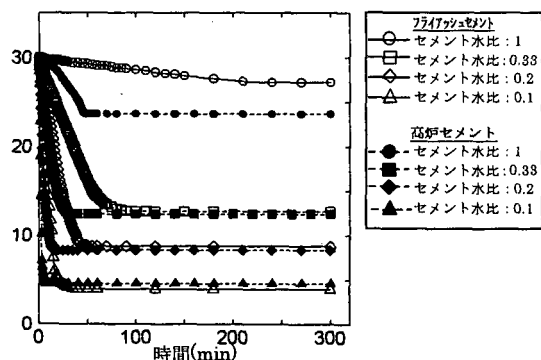
まず、フライアッシュセメントの圧送特性および分離特性を把握するために、フライアッシュセメントを用いた粘性およびブリージング試験を行った。粘性試験はB型粘度計を用い、B型粘度計のローターに作用するせん断応力を粘性の大小を表すパラメータとした。ブリージング試験では、1リットルのメスシリンダーに高さ30cmまでフライアッシュセメントを入れ、時間の経過によってセメントと水の分離高さを測定した。試験に用いたセメント水比：C/Wは、0.1、0.2、0.33、0.5、1.0である。また、比較のため急冷された高炉スラグとセメントの混合材である高炉セメントについても同様の試験を行った。

図—1にC/Wとローターに作用するせん断応力の関係を示す。ただし、図中のせん断応力は、ローターの回転数が30rpmでの値である。この図より、C/Wが大きくなるほど、すなわちセメント濃度の増加とともに、せん断応力すなわち粘性が大きくなることが分かる。これは、セメント濃度が増大するにつれて溶液に含まれている溶質の量が増大するためである。また、高炉セメントの方がフライアッシュセメントのより方が粘性が大きい。この結果は、フライアッシュセメントの方がポンプで圧送し易いことを意味している。

図—2にC/Wが0.1、0.2、0.33、1.0における時間の経過とセメント・水の分離高さの関係を示す。この図より、C/Wが大きくなるほど分離高さの低下が緩やかになることが分かる。これは、セメント濃度が大きくなるほど、単位体積中に含まれるセメント粒子数が増え、隣接する粒子との距離も小さくなってセメント粒子間で強い干渉が発生すること、またメスシリンダーの下方にある水分子に着目した場合、セメント粒子数が増大することによりセメントの堆積層も厚くなり、水分子がセメントの堆積層表面まで上昇するのにより多くの時間が必要となる等の影響により、ブリージングが終了するまでにより多くの時間が費やされたと考えられる。フライアッシュセメントと高炉セメントを比較すると、いずれのC/Wにおいても、フライアッシュセメントの方がブリージングし難いことが認められる。これは、フライアッシュセメント中に含まれるベントナイト等が分散剤としての機能を発揮し、容易に消澄しないことに起因すると思われる。



図—1 セメント水比とせん断応力の関係



図—2 経過時間とセメント・水の分離高さの関係

(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が充填材としての機能を発揮するか否かについて検討するために、土槽を用いた注入試験を行った。図-3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裏込め材を作製する水槽、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)、マンメータの 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。充填材は作製した後、放置しておく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、充填材の注入過程を明らかにする。なお、本試験に用いたマサ土の粒径は 1.70~4.75mm、充填材のセメント水比は 0.1 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、マンメータは、No.2~No.10 までセル内のマサ土表面からそれぞれ 50, 55, 60, 70, 80, 90, 110, 130 および 150 mm に、マンメータ No.1 および No.11 は、それぞれセル上部ならびにセル下部に設置された。また、比較のためにダムグラウト等で一般的に用いられる高炉セメントの充填も併せて実施した。

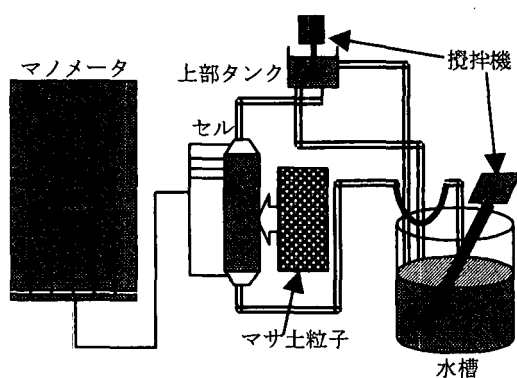


図-3 注入実験装置の概要

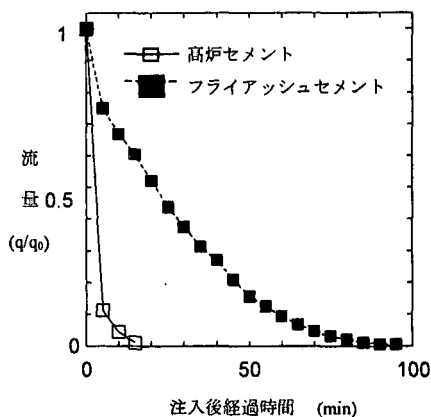
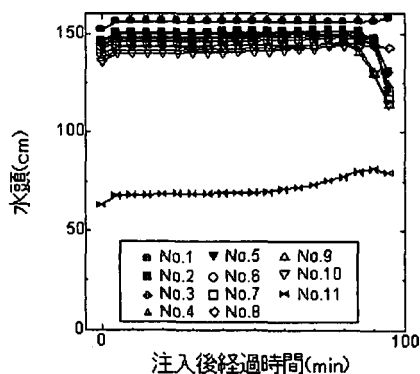
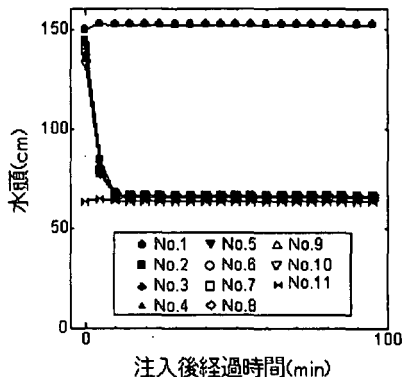


図-4 注入後の経過時間と流量変化の関係



(a) フライアッシュセメント



(b) 高炉セメント

図-5 注入後経過時間と水頭の関係

充填材の注入後の経過時間と流量変化の関係を図—4に示す。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ていることが分かる。また、高炉セメントの方が短時間で流入が停止している。図—5 (a), (b)には、注入後経過時間とフライアッシュセメントと高炉セメントにおける各マノ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、各マノ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 分程度で減少することが分かる。一方、高炉セメントを用いた場合、各マノ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、一方高炉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、高炉セメントは注入開始直後からマサ土試料表面で溶液成分が堆積し、短時間で土槽からの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、高炉セメントよりも有用であると考えられる。

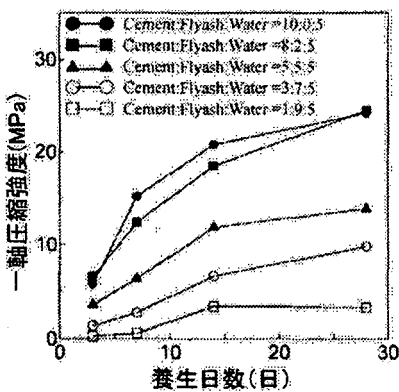
(3) フライアッシュセメントの強度試験

次に、フライアッシュセメントの硬化特性について検討するために、養生日数をパラメータとした一軸圧縮試験を行った。セメント：フライアッシュ：水の重量配合比は表—3に示すように、5種類の充填材について検討した。また、養生日数は3、7、14、28日とし、直径50mm、高さ100mmの供試体をモールドにより作製した。

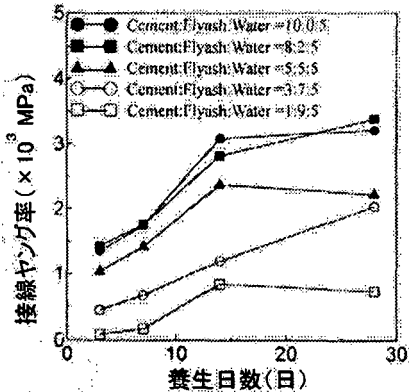
図—6、図—7に養生日数と一軸圧縮強度ならびに50%強度における接線ヤング率の関係を示す。この図より、セメントの割合が増大すると当然のことながら強度、耐変形性も大きくなっている。セメントとフライアッシュの配合量と強度ならびに変形性について見てみると、フライアッシュの配合量が増大するほど、強度ならびに耐変形性が小さくなる。特にフライアッシュが供試体に占める割合が9割になると、セメントのみの供試体の強度の15%程度にまで低減する。また、セメントのみの供試体は養生後7日程度で28日強度の50%程度まで発揮するが、フライアッシュセメントの配合量が増大するにつれて、50%強度程度になる日数が増大する。したがって、フライアッシュを混合することにより、強度、耐変形性とも減少し、強度、耐変形性を発揮するためにはかなり

表—3 試料のセメント・フライアッシュ・水の重量配合比

試料番号	ポルトランドセメント (%)	フライアッシュ (%)	水 (%)
①	10	0	5
②	8	2	5
③	5	5	5
④	3	7	5
⑤	1	9	5



図—6 養生日数と一軸圧縮強度の関係



図—7 養生日数と接線ヤング率の関係

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分かる。

(4) フライアッシュセメント充填後の温度上昇⁶⁾

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い、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検討しなければならない。この場合、充填材の熱特性値等の基礎的資料を把握する必要がある。そこで、充填材として一般的に用いられるエアームタル、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。表-4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、エアームタルよりも熱伝導率、熱拡散率とも大きいため、充填後の温度上昇が小さいということが分かる。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ているため、単位セメント量はエアームタルの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分かる。さらに、現場計測結果より、フライアッシュセメント充填前の温度16.1℃が充填60時間後に充填材中心部の最高温度が36.1℃程度であったという結果からも判断すると、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、上記の問題も低減できると思われる。

表-4 各種充填材の熱特性値

材料名	密度	熱伝導率	熱拡散率	積算発熱量	比熱	温度上昇量	単位セメント量
フライアッシュセメント	1,500	1.00	1.00	10	0.667	15.0	130
エアームタル	1,000	0.75	0.775	40	0.968	41.3	300
セメントーベントナイト系	1,700	1.10	1.10	60	0.588	102.0	750

ただし、密度: kg/m³, 熱伝導率: kcal/mh℃, 熱拡散率: ×10⁻³m²/h, 積算発熱量: kcal/℃, 比熱: kcal/kg℃, 温度上昇量: ℃, 単位セメント量 kg/m³

5. まとめ

本報告では、フライアッシュセメントの適用例ならびに諸性質について述べ、今後益々増大するであろう充填材としてのフライアッシュセメントの適用性について検討した。その結果、フライアッシュセメントは、高炉セメントに比して、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。

参考文献

- 1) 島田他: 資源・素材関係学協会合同秋季大会, 企画発表・一般発表(A)(B)資料, pp. 233-236, 2002
- 2) 古賀他: 資源と素材, Vol. 116, No. 3, pp. 209-214, 2001
- 3) 松井他: 第11回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, K02(CD-ROM), 2002
- 4) 資源エネルギー庁編: コールノート, 2002
- 5) 環境技術協会他: 石炭灰ハンドブック(第2版), 1995
- 6) FF21 工法協会: FF21 工法協会資料, 2002