

石炭灰のシールド裏込め注入材への適用

UTILIZATION FLYASH FOR BACKFILL GROUTS OF SHIELD-TUNNEL

米田 治*・出光 恵**・小泉 一人***

Osamu YONEDA, Kei IDEMITSU and Kazuhito KOIZUMI

This paper investigates the backfill grouts included flyash, and the result of backfill grouting in the construction of shield-tunnel. The quality of this flyash, utilized for this grouts, was below to JIS. Putting stress on bleeding ratio and flow value in workability of the grouts, the mix proportion of the grouts was settled by design of experiments. As a result, the grouting pressure went up and was over the capacity of the grout pump, but it was possible to convey the grouts 530m from the plant. And the ratio of the grouts to the tail void was 130% in diluvial ground.

Keyword: shield-tunnel, backfill grouts, flyash, workability

1. まえがき

石炭火力発電所から産出される石炭灰のうち、セメント混和材などとして有効利用されているのは40%程度であり、60%近くが費用をかけて処分されている。処分されている石炭灰のうち90%以上は、JIS 規格のセメント材料として使用されていない粗粉であるが、これら未使用の石炭灰を土木材料として活用することは工事費の節減になるだけでなく、資源の有効利用の観点からも求められているものであり、今回シールドトンネルの裏込め注入材料に石炭灰を利用する事を検討した。

2. 石炭灰の現状と性質

石炭灰は石炭火力発電所の微粉炭燃焼ボイラーから発生し、その発生率は重量比にして15%程度である。また、表-1に示すように今後も石炭火力発電所設備容量の拡充が予想されることから、石炭灰の発生量も漸次増加することが推定される。現状では発生した石炭灰のうち約40%がセメント材料等として有効利用されているが、残りの60%近くは埋立処分されている(表-2)。また、埋立処分されている石炭灰のおよそ90%は JIS規格外の粗粉と呼ばれるものであり、今回利用した石炭灰も基本的にはこれに該当する。表-3に使用した石炭灰の特性、表-4に溶出試験結果を示す。

* 正会員 東京電力(株)地中線建設所船橋工事事務所

** 正会員 東京電力(株)環境部環境技術課

*** (株)ハザマ

表－１ 石炭灰推定発生量

年 度	1995	2000
石炭火力発電所設備容量(万kw)	2 0 1 2	2 9 9 7
石 炭 使 用 量(万tf)	4 5 2 7	6 7 4 3
石 炭 灰 発 生 量(万tf)	6 7 9	1 0 1 1

出典：石炭灰ハンドブック（日本フライアッシュ協会）

表－２ 国内電力業界の石炭灰処理実績

年 度	1987	1988	1989	1990	1991
石 炭 使 用 量 (tf)	2429	2449	2544	2724	2926
石炭灰発生量 (tf) (発生率) (%)	404 (16.6)	401 (16.5)	385 (15.1)	391 (14.4)	413 (14.1)
処理 量 内 訳					
有効利用量 (tf) (利用率) (%)	181 (44.8)	182 (45.4)	162 (42.1)	68 (40.7)	189 (45.8)
埋 立 量 (tf) (利用率) (%)	223 (55.2)	219 (54.6)	223 (57.9)	232 (59.3)	224 (54.2)

出典：石炭灰ハンドブック（日本フライアッシュ協会）

表－３ 石炭灰の特性

比 重	比表面積	単 位	圧 縮	ig. loss	湿 分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	その他
	cm ² /g	水 量 比	強 度 比	%	%	%	%	%	%	%	%
2.09	3403	100.3	66.5	4.1	0.2	52.7	29.1	3.1	5.7	1.2	8.2

石炭灰：常磐共同火力(株)勿来発電所産

表－４ 石炭灰の溶出試験結果（単位：mg/l）

	水銀	カドミウム	鉛	有機リン	六価クロム	ヒ素	シアン
埋立処分に係る判定基準	<0.005	<0.3	<3	<1	<1.5	<1.5	<1
海洋投入処分に係る判定基準	<0.005	<0.1	<1	<1	<0.5	<0.5	<1
水道法による水質基準	ND	<0.01	<0.1	ND	<0.05	<0.05	ND
常磐共同火力(株)勿来発電所	ND	ND	ND	ND	<0.04	<0.01	ND

ND：検出限界以下を示す。

3. 配合検討

裏込注入はシールド掘進で生じるテールボイドを早期に充填し、応力解放に伴う地山の沈下防止を主な目的として実施しており、注入材には①流動性に富み、長距離圧送が可能、②充填性が良く水に希釈されにくい、③凝結開始後の溶出や体積変化が少ない、④瞬結性を有し、早期強度が得られる、⑤止水効果が良好で耐久性がある等の品質が求められる。そこで、これらを評価する尺度の一つとして表－５に示す項目について、施工実績と地盤特性から基準値を設定し、裏込注入材に対する要求品質とした。

裏込注入材に石炭灰を適用した実績は過去何例か報告されているが、配合がそれぞれ異なることや混和剤等の種類が明確でないため、本工事では表－６に示す現場で採用している一般の裏込注入材の配合を基本配合とし、この基本配合をもとに石炭灰を混入した場合の配合を検討した。なお、初期強度とゲルタイムを確保するため助材の配合は一定とし、配合の検討は主材についてのみ行った。

表－５ 要求品質

比 重	フロー値	ゲルタイム	ブリージング (1時間後)	圧 縮 強 度 (3時間後)
1.2～1.45	35cm以上	4～10秒	4%以下	0.5kgf/cm ² 以上

表－６ 裏込注入材の基本配合

材 料	主 材				助 材
	セメント	分離防止材	分散遅延材	水	
使用量	230kgf/m ³	80kgf/m ³	1.2kgf/m ³	804ℓ/m ³	90ℓ/m ³

3. 1 配合試験計画

配合検討は裏込注入材を構成している各材量の使用量を変えて試料を作成し、配合試験を行って要求品質を満足するか確認する方法で行った。各材量の特徴と配合試験での使用量、およびその決定根拠を表－７に、また各試料の配合を表－８に示す。なお、表－８に示した27通りの配合試験を同一条件で実施するのは困難なことから、実際の配合試験は実験計画法に基づき、直交表L₉(3⁴)を用いて表－９の試料9通りについて行うことにした。配合した試料に対する測定項目は、上記①～③に重点を置き、要求品質のうちこれらに密接に関係するブリージングとフロー値とした。さらに、セグメント組立てやトラブル等により配管内に注入材が滞留することを考慮し、ブリージングとフロー値の経時的な変化を確認するため、練り混ぜ直後の他、1時間後、3時間後、6時間後についても測定を行った。

表－７ 各材料の特徴と使用量

材 料	使用量 (kgf/m ³)	特 徴
セメント	150	高炉水砕スラグと特殊スラグを主成分とする微粒子セメント(エスハイト)。強度の発現に寄与するため、メーカーの実績から使用量を決定。
石 炭 灰	600 700 800	石炭燃焼後の灰の総称で二酸化ケイ素を主成分とする。 既往工事の実績、および700kgf/m ³ を使用した予備試験結果(ブリージング1.7%、フロー値53cm)と、要求品質(4%、35cm)を比較して使用量を決定。
分離防止材	0 20 40	ベントナイト。 既往工事の実績40kgf/m ³ を最大として、使用量を決定。
分散遅延材	0 0.45 0.90	オキシカルボン酸塩を主成分とする水和反応遅延材(SP-R)。 コストが高いこと、使用量が少ないことからメーカーの実績である0.9kgf/m ³ を最大として使用量を決定。

3. 2 試験結果

(1)分散分析結果について

表-10にブリージングとフロー値の測定結果を示す。これは、実験計画法に基づいて表-8の27通りの試料から抽出した9通りの試料についての結果であるため、この結果から表-8の27通りの試料について、1時間後のブリージングと練り混ぜ直後のフロー値を分散分析結果を基に推定した。表-11に示した推定結果から1時間後のブリージングの95%信頼区間上限値と練り混ぜ直後のフロー値の95%信頼区間下限値が、表-5に示す要求品質（4%以下、35cm以上）を満足する配合は表-11のNo. 9の1通りであることが明らかになったため、試験施工で使用する配合はこのNo. 9とした。

表-8 各材料の配合

No.	セメント (kgf)	石炭灰 (kgf)	分離防止材 (kgf)	分散遅延材 (kgf)	水 (ℓ)
1	150	600	0	0	684
2	150	600	0	0.45	684
3	150	600	0	0.90	684
4	150	600	20	0	676
5	150	600	20	0.45	676
6	150	600	20	0.90	676
7	150	600	40	0	668
8	150	600	40	0.45	668
9	150	600	40	0.90	668
10	150	700	0	0	639
11	150	700	0	0.45	639
12	150	700	0	0.90	639
13	150	700	20	0	631
14	150	700	20	0.45	631
15	150	700	20	0.90	631
16	150	700	40	0	624
17	150	700	40	0.45	624
18	150	700	40	0.90	624
19	150	800	0	0	595
20	150	800	0	0.45	595
21	150	800	0	0.90	595
22	150	800	20	0	587
23	150	800	20	0.45	587
24	150	800	20	0.90	587
25	150	800	40	0	571
26	150	800	40	0.45	571
27	150	800	40	0.90	571

表-11 推定結果

No.	推 定 値	
	ブリージング (%) 上限値※	70-値 (cm) 下限値※
1	7.7	5.1
2	7.4	5.4
3	7.0	5.6
4	5.3	4.3
5	4.9	4.6
6	4.5	4.8
7	4.5	3.3
8	4.2	3.5
9	3.9	3.8
10	7.3	4.2
11	7.0	4.4
12	6.6	4.6
13	4.9	3.4
14	4.6	3.6
15	4.2	3.8
16	3.9	2.4
17	3.8	2.6
18	3.4	2.8
19	6.2	3.4
20	5.9	3.6
21	5.9	3.9
22	3.8	2.6
23	3.5	2.8
24	3.2	3.1
25	3.2	1.6
26	3.2	1.8
27	3.2	2.0

※) 95%信頼区間の上限と下限を示す

表-9 配合試験を実施する試料

No.	セメント (kgf)	石炭灰 (kgf)	分離防止材 (kgf)	分散遅延材 (kgf)	水 (ℓ)
1	150	600	0	0	684
5	150	600	20	0.45	676
9	150	600	40	0.90	668
11	150	700	0	0.45	639
15	150	700	20	0.90	631
16	150	700	40	0	624
21	150	800	0	0.90	595
22	150	800	20	0	587
26	150	800	40	0.45	571

表-10 試験結果

	ブリー ジング (%)					フ ロー 値 (c m)				
	直 後	1時間後	3時間後	6時間後	24時間後	直 後	1時間後	3時間後	6時間後	
1	0.0	4.9	14.6	18.3	17.7	54	31	23	12	
5	0.0	1.8	5.3	8.4	9.5	49	25	22.5	18	
9	0.0	0.06	2.5	4.4	7.2	41	27	20	18	
11	0.0	3.3	8.7	14.5	16.0	47	30	22	20	
15	0.0	1.4	5.2	7.6	9.7	41	27.5	20	17	
16	0.0	1.0	1.7	2.0	1.7	27	16	12	8	
21	0.0	2.4	7.5	10.5	17.5	42	25.5	21	18	
22	0.0	0.06	2.3	3.4	2.3	29	16	13	8	
26	0.0	0.01	0.07	2.7	1.8	20.5	12	11	8	

(2)寄与率について

分散分析から得られた各材料のブリージングとフロー値に対する寄与率を図-1に示す。図-1から、ブリージングに対する寄与率は放置時間に関係せず分離防止材が70~80%、石炭灰が5~15%、分散遅延材が0~5%となっており、分離防止材の効果が大きいことがわかる。フロー値に対する寄与率についても放置時間と関係なく、分離防止材と石炭灰が40~50%、分散遅延材が5~15%で分離防止材と石炭灰が同程度に大きいことがわかる。

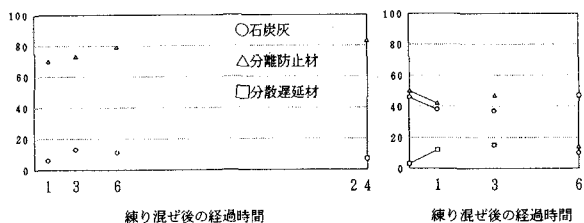


図-1 寄与率 (%)

(3)主効果について

図-2に主効果を示す。図-2から分離防止材、石炭灰、6時間後と24時間後を除く分散遅延材とも放置時間に関係なく使用量が多いほどブリージングが小さくなる。寄与率の高い分離防止材について見ると、使用量を20kgf/m²増やせば放置1時間後でブリージングが1.5%程度改善される(小さくなる)。フロー値は分離防止材、石炭灰の使用量が多いほど小さくなり、分散遅延材の使用量が多いほど大きい。寄与率の大きい分離防止材、石炭灰について見れば分離防止材を20kgf/m²、あるいは石炭灰を100kgf/m²減らすと約9cmフロー値が改善される(大きくなる)ことがわかる。

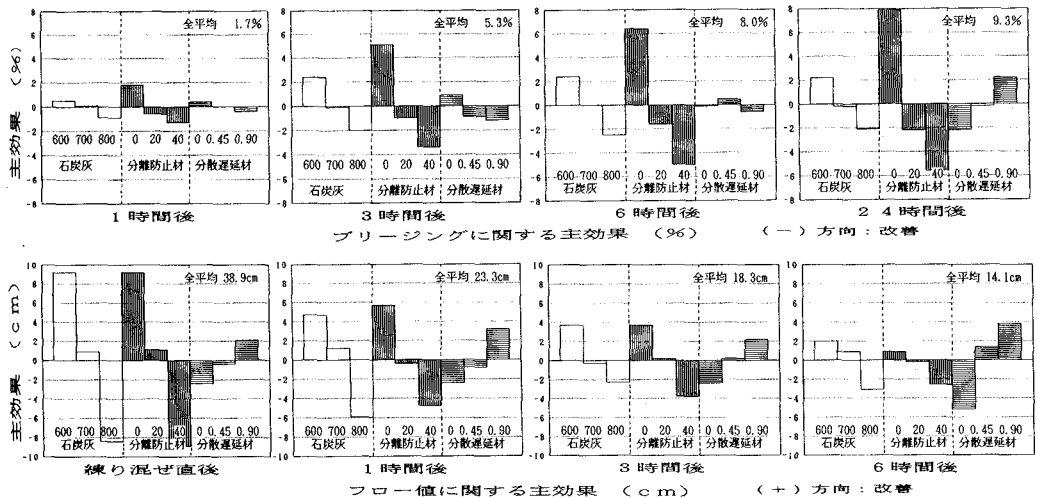


図-2 主効果 (図中の数字は各材量の使用量 (kgf/m²))

3. 3 施工模擬試験

(1)試験方法

試験施工を実施するに当たり、実際の配管を使用して圧送性の確認を行った。配管は地上の作業基地内に図-3のように設置した。この配管の途中には圧力計を取り付けて管内圧力を測定し、管内摩擦と管の屈曲による圧力損失を求めて圧送が可能な距離を推定した。圧送流量は30ℓ/min, 40ℓ/min, 50ℓ/minとし、注入材の練り混ぜ直後について調査した。なお、圧送流量40ℓ/minについては配管内に1時間、および3時間放置した後での圧送性についても調査した。

(2)試験結果

表-12に圧力測定結果を示す。圧送流量40ℓ/minでの練り混ぜ直後についてを見ると、圧力計No.3 ~No.4間(10m)の圧力損失0.321kgf/cm²から、1m当たりの管内摩擦による圧力損失 $f_1 = 0.0321\text{kgf/cm}^2$ 、また圧力計

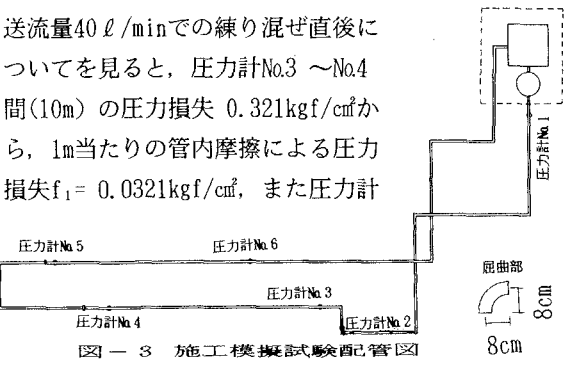


表-12 圧力測定結果							
圧送距離 (m)	2.0 m	2 m	1.0 m	1.0 m	1.0 m		
屈曲数	4	1	0	2	0		
圧力計番号	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	圧送流量
圧送開始時	3.117	2.459	2.373	2.053	1.579	1.443	30 ℓ / 分
	3.607	2.911	2.813	2.492	1.991	1.843	40 ℓ / 分
	3.499	2.777	2.677	2.346	1.837	1.686	50 ℓ / 分
1時間放置後	4.134	3.412	3.402	3.084	2.614	2.536	40 ℓ / 分
3時間放置後	4.558	3.514	3.408	2.921	2.328	2.185	

圧力の単位は (kgf/cm²)

No.1 ～No.6 間(52m)の圧力損失 1.764 kgf/cm^2 と f_1 から、管の屈曲によって生じる圧力損失 f_2 を計算すると、 $f_2 = 0.0135 (= (1.764 - f_1 \times 52) / 7) \text{ kgf/cm}^2$ となる。ここでポンプの圧送能力 $P_1 = 25 \text{ kgf/cm}^2$ と予想される最大の裏込注入圧 $P_2 = 3.5 \text{ kgf/cm}^2$ および裏込注入ポンプからトンネル坑口までに設置されている配管の屈曲部の数12箇所を考慮して圧送が可能な距離 $L (= (P_1 - P_2 - 12 \times f_2) / f_1)$ を計算すると、練り混ぜ直後で663m、放置1時間後で668m、放置3時間後で451mとなり、放置3時間後になると急激に圧送可能な距離が短くなっている。同様にして圧送流量 30 l/min と 50 l/min の場合について計算すると、672m、645mとなり、練り混ぜ直後での圧送可能な距離は圧送流量にほとんど影響されないことがわかる。

4. 試験施工（滞水砂地盤への適用）

千葉県船橋市東部の滞水砂層（成田砂層，N値＝6～50，砂分：91％，透水係数 $k = 1.2 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ ）における地中送電線路建設のためのシールド工事で、石炭灰を適用した裏込注入の試験施工を実施した。この工事のシールド機は泥水加圧式で外径 3.940m，セグメント外径 3.800m，内径 3.300mないし 3.400m，施工延長は1924.6mである。

4. 1 圧送距離

配合試験で採用し、施工模擬試験で圧送性を確認した配合（表－11のNo. 9）を用いて実現場での裏込注入の試験施工を開始した。試験施工はトンネル坑口から91m（76Ring，圧送距離 140m）の地点より開始したが、18mほど施工した段階（91Ring，坑口から 109m，圧送距離 160m）での圧送圧力がポンプの能力（ 25 kgf/cm^2 ）以上に上昇し圧送不可能になった。このため裏込注入材の圧送性，すなわち流動性を増すことを検討した。前述の配合試験の結果から，流動性を示す尺度となるフロー値を増加させるにはベントナイトあるいは石炭灰の使用量を減らせば良いことがわかっているが，ベントナイトはブリージングに対する寄与率が高いため使用量を減少させるとブリージングが増加する。そこで石炭灰の使用量を 100 kgf/m^3 減らして再度配合試験を行ったところ要求品質（表－5）を満足し，流動性についても良好な結果を得られたことから，以後この配合を用いて試験施工を再開した。表－13に見直し後の配合，表－14に見直し後の配合による試験結果を示す。見直し前の試験結果と比較すると，1時間後のブリージングは0.06％が 1.0％へ若干増加しているが，練り混ぜ直後のフロー値については41cmが50cmに改善されている。また，3時間後の一軸圧縮強度についても 10 kgf/cm^2 以上であった。

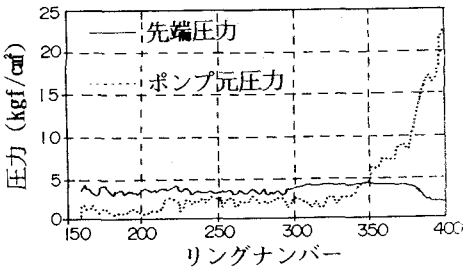
再開後の試験施工は順調に進み当初予定していた圧送距離（440m）に達したため，坑口から 420m（350 Ring，圧送距離 470m）まで裏込注入が完了した段階で坑口の配管をはずし内部の状況を観察すると，毎回管内を清掃しているにも関わらず内径50mmに対して内壁全体に約10mm付着物が見られた。さらに，試験施工を続けたところ，坑口から 480m（400Ring，圧送距離 530m）に達した時点で図－4に示すように圧送圧力がポンプ能力に達して圧送不可能になったことから，再度坑口の配管内を確認したところ付着物でほとんど閉塞状態となっていた。このため新規の配管に取り替え基本配合の裏込注入に変更することにし，石炭灰を使用した裏込注入の試験施工を終了した。

表－13 見直し後の配合

セメント	石炭灰	分散防止材 (ベントナイト)	分散遅延材	水
150 kgf/m ³	500 kgf/m ³	40 kgf/m ³	0.90 kgf/m ³	714 l/m ³

表－14 見直し後の配合による試験結果

ブリージング（％）					フロー値（cm）				
直後	1時間後	3時間後	6時間後	24時間後	直後	1時間後	3時間後	6時間後	
0.0	1.0	4.6	6.4	9.2	50	36	24	20	



図－4 圧送距離と圧送圧力の関係

4. 2 裏込注入状況

石炭灰を適用した場合の平均裏込注入率は130%であり、裏込注入の注入厚さを測定した結果は図-5のとおりであった。注入厚さは、図-6のようにグラウトホールを利用して貫入針（コンペンネトロメータ）を差し込み、貫入抵抗が変

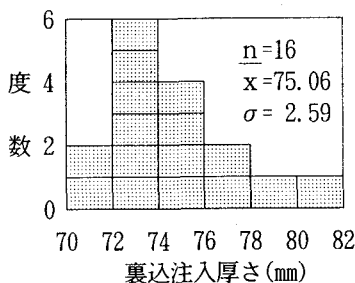


図-5 裏込注入厚さ測定結果

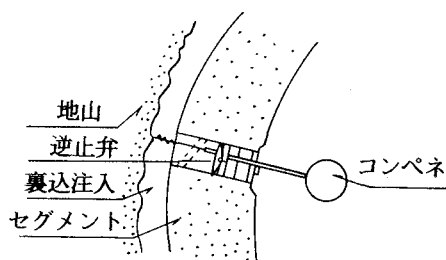


図-6 裏込注入厚さ測定方法

化した時の貫入量とした。図-5から、注入厚さはテールボイド量70mmを上回っており、充填性は良好であることがわかった。

5. 軟弱粘性土地盤への適用

前項までに述べた施工実績を基に、軟弱粘性土地盤（有楽町下部層、N値＝0～2、粘土・シルト分：98%、一軸圧縮強度 $q_u = 0.86 \text{ kgf/cm}^2$ ）におけるシールド工事の裏込注入に石炭灰の適用を試みた。現場は千葉県市川市南部の臨海地域に位置し、泥土加圧式シールド工法により延長1017.5mを掘進するもので、シールド機の外径は3.630m、セグメントは外径3.500m、内径3.000mないし2.950mである。シールドの掘進対象地盤は主に沖積粘性土層の有楽町下部層である。

石炭灰を適用した裏込注入材の配合は、先の場合と同様に現場で採用した一般の裏込注入材（基本配合）を基に配合試験から決定した。決定した配合を表-15に、またこれらの注入材に対する要求品質を表-16に示す。石炭灰を適用した裏込注入材による施工はトンネル坑口から82m（68Ring、圧送距離132m）の地点から開始し、572m（476Ring、圧送距離612m）まで実施した。注入率は平均150%程度であり基本配合の場合と同程度であった。

表-15 裏込注入材の配合

セメント	石炭灰	分離防止材	分散遅延材	水
230kgf/m ³	300kgf/m ³	20kgf/m ³	2ℓ/m ³	696ℓ/m ³

表-16 要求品質と配合試験結果

	P.フロー値	ゲルタイム	ブリーディング (1時間後)	圧縮強度 (1時間後)
要求品質	9~11秒	8~12秒	3.0%以下	1.0kgf/cm ² 以上
石炭灰適用配合	$\bar{x}=10.4$ $\sigma=0.159$	$\bar{x}=10.6$ $\sigma=0.460$	$\bar{x}=1.01\%$ $\sigma=0.0218$	$\bar{x}=3.88 \text{ kgf/cm}^2$ $\sigma=0.586$

6. あとがき

石炭灰を使用した裏込注入材は、地山への注入状況を見る限り一般に使用されている注入材と比較して遜色ないことが明らかになった。しかし、施工性に関しては、石炭灰の使用量を増やすと流動性が低下し、練り混ぜ後の放置時間が長くなるほどこの傾向が大きくなることや、配管内に材料の一部が付着しやすく、施工期間が長くなると配管の閉塞を生じやすいこと等問題のあることがわかった。

コスト面については、石炭灰専用のサイロを設置するなどプラントの改良等に伴う費用が必要となるが、材料費を見ると一般の裏込注入材に比べ石炭灰を利用したことにより20%程度削減されとの結果が得られている。試算例によれば、300～400m³以上の数量を使用できれば、裏込注入工事全体のコスト削減が可能になる。

今後はさらに配合の改良を加えるとともに設備の改良等の諸問題を克服し、石炭灰の有効利用を進めていく必要があると思われる。