

V-2 シールド工事における石炭灰の有効利用に関する一考察

NTT北海道設備建設センタ 正会員 今野 敏明
 同 上 正会員 岡本 保幸
 同 上 佐藤 厚司
 協和電設(株) 技術研究所 正会員 宮前 悦則

1. はじめに

シールド工事に使用されている粘性付与材(泥漿材)及び裏込注入材には、現在、陶土を主成分としたものを使用している。粘性付与材とは土圧系シールド工事において、バインダ分の少ない地山を掘進する際の切羽の安定化、カッタービット、スクリュコンベアの損耗等を少なくするために用いるものであり、裏込注入材とはシールド掘進に伴い生じるテールボイドを迅速に充填し、地山の緩みや崩壊による地盤沈下の防止等のために用いるものである。

近年、石炭火力発電所等より産出される石炭灰の有効利用のための研究は、各方面でなされているが、ここでは、陶土を石炭灰に置き換えて、所定の性能を有するシールド工事用の粘性付与材及び裏込注入材の最適配合を見つけるための実験検討を行ったので報告する。

2. 石炭灰の現状と性質

石炭灰は石炭燃焼後の灰の総称であり、北海道における産出量は、年間約150万tに達している。近年、その利用方法も炭坑充填材、埋戻材、路床路盤材、セメント混和材等に及び、その利用率は産出量の約30~40%となっている。

石炭灰の性質としては、次のような特徴を持っている。

表-1 石炭灰と陶土の化学組成(主成分)(%)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	その他
石炭灰	50~55	25~30	1~7	—	1~7	1~2	~10
陶土	60~75	—	—	5~8	10~25	—	~7

① 石炭灰の化学組成は、表-1に示すとおりであり、陶土と同様シリカ(SiO₂)が主成分となっている。また、石炭灰中に含まれる石灰分により、自己硬化性がある。

② 比重は2.2程度であり、陶土に比べてかなり小さい。

③ 粒径加積曲線は図-1に示すとおりで、陶土に比べ粘土分がいくぶん少ないが、平均粒径は10~30μでありその形状は球形に近いため、流動性に富む。

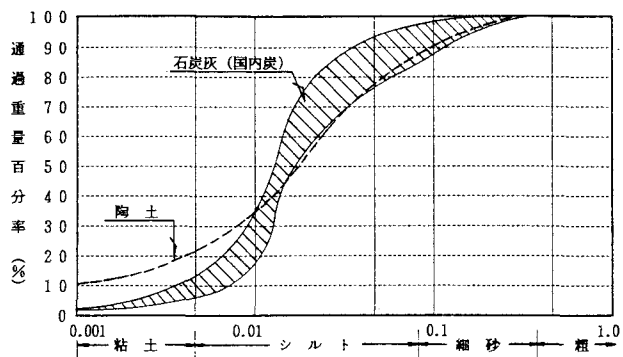


図-1 石炭灰と陶土の粒径加積曲線

3. 粘性付与材への適用検討

3.1 室内実験

石炭灰を用いた粘性付与材の最適配合を見つけ出すため、石炭灰は国内炭燃焼灰のフライアッシュ

(江別火力発電所産)を使用し、3種類のベントナイトに対して配合実験を行った。実験は、水、ベントナイト、石炭灰の順に、ハンドミキサーにより混合攪拌して、C型回転粘度計で粘性を測定し、さらにフロー試験、ブリージング試験を行った。なお、最適配合の決定にあたっての目標は、従来から使用している陶土系の粘性付与材の特性等より、次のとおり設定した。

- ① 初期粘性：8,000 cp～12,000 cp
- ② フロー値：15cm程度
- ③ 時間経過による粘性変化が小さいこと
- ④ 付着性が小さいこと

表－2 各試料の配合（粘性付与材）

試料 No	配 合 (kgf)					水 比 (%)	比 重	
	ベントナイト			陶 土	石炭灰			
	A	B	C					
1	350			250		750	80	1.39
2	350				250	750	80	1.34
3		150		450		750	80	1.40
4		150			450	750	80	1.32
5		150			450	850	70	1.29
6			50	550		750	80	1.40
7			50		550	750	80	1.31
8			50		550	850	70	1.28

3.2 実験結果及び考察

表－2に各試料の配合、表－3に各試料の特性を示す。これより粘性付与材に石炭灰を使用した場合次のことがいえる。

- ① 石炭灰を使用した場合、陶土に比べ初期粘性は高い傾向にある。
- ② 石炭灰を使用した場合、陶土に比べ同程度の初期粘性であっても、フロー値は小さい。
- ③ 石炭灰を使用した場合、フロー試験時の円筒からの試料の抜け出しが良く、付着物が少ない。
- ④ 石炭灰を使用する場合においても、陶土の場合と同様、ベントナイトの使用量はその種類に大きく左右される。

これらのことから、石炭灰は陶土に比べ高粘性下での圧送性は優れているものと考察できる。

3.3 現場実験

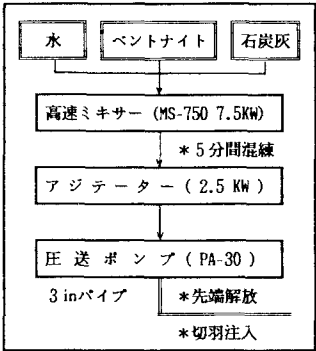
現場実験は、現在工事中の札幌東局～北局間シールド工事現場で配合・圧送実験を実施した。配合実験は、大型高速ミキサー（容量0.5m³）で5分間混合攪拌して、初期粘性を測定し、フロー試験を行った。圧送実験は、圧送ポンプPA-30（最大元圧30kgf/cm²）と3in(75mm)パイプを使用して行った。図－2に現場実験方法を示す。

- 1) 第1回現場実験（63.7.14）はシールド推進350m地点で、配合・圧送実験を実施した。表－4に現場実験の配合と特性、表－5に圧送実験結果を示す。

現場配合実験結果の特性としては室内実験結果に比べ、粘性は

表－3 各試料の特性（粘性付与材）

試料 No	特 性 値			備 考	適 否
	初期粘性 (CP)	フロー値 (cm)	付着度		
1	5,000	26.0×26.0	中	経時粘性大	
2	7,000～7,500	17.3×17.1	中	経時粘性大	
3	3,400	22.0×19.5	中	初期粘性小	
4	12,000～13,000	12.6×12.8	小		△
5	9,000～10,000	14.7×14.8	小		○
6	1,500～2,000	26.5×26.8	中	初期粘性小	
7	8,000～9,000	18.5×18.7	小		○
8	4,600～5,000	19.0×19.5	小	初期粘性小	



図－2 現場実験方法

いくぶん小さく、フロー

値は大きい値となっている。また、圧送実験結果はパイプ先端解放で 2.0 kgf/cm²(距離300m)、切

羽注入で10.0kgf/cm²(距離350m)と圧送状況は非常に良く、従来配合(陶土)の1/3 程度のポンプ元圧を示している。なお、採用した配合は試料No.4である。(試料No.5、試料No.7については、テスト圧送の結果が良好であったので、さらに高粘性での圧送実験を行った。)

表-4 現場実験の配合と特性

材料名	セメント	石灰	水	水 比	比 重	水 温	γ ₀ 値	初期粘性(cp)
配合量	150	450	750	80%	1.33	11℃	17cm	9000~13000

表-5 圧送距離とポンプ元圧

条 件	圧送距離	ポンプ元圧	パイプ 径
先端解放	300m	2.0kgf/cm ²	3 in (75mm)
切羽注入	350m	10.0kgf/cm ²	3 in (75mm)

2) 第2回現場実験(63.11.21)はシールド掘進714m地点で、配合・圧送実験を実施した。実験方法は前回と同様である。図-3に圧送実験概略図、表-6に圧送距離とポンプ元圧を示す。なお、ポンプ元圧はパイプ先端解放時の値である。

実験の結果としては、圧送時の初期粘性は9,000 cpと前回の実験とほぼ同じであったが、圧送開始後に各測点での粘性を順次計測していくうちに、粘性の上昇傾向が見られ、測点②で14,000cp、測点③で15,000cp、④では初期粘性の倍近い17,000cpを示した。この時の、材料温度及び坑内温度は圧送開始時(A点立坑)のほぼ倍近い温度であった。しかしながら、A点立坑の大型高速ミキサー内の粘性付与材の粘性は、初期粘性とほぼ同じ10,000cpであった。

ポンプ元圧については、測点②で13~14kgf/cm²(413.0m:14,000cp)と測点①に比べ倍以上の上昇を示している。その後測点②、測点③では、粘性と距離の増加と共にポンプ元圧は上昇し、測点④では17,000cpという高粘性にもかかわらず、ポンプ元圧20kgf/cm²で714.0mの圧送は可能であった。

現場実験の結果から、粘性付与材に石灰灰を使用した場合、温度上昇に伴うセメントの膨潤によるものと考えられる粘性の増加はあるが、陶土を主成分とした粘性付与材に比べ、高粘性での長距離圧送が可

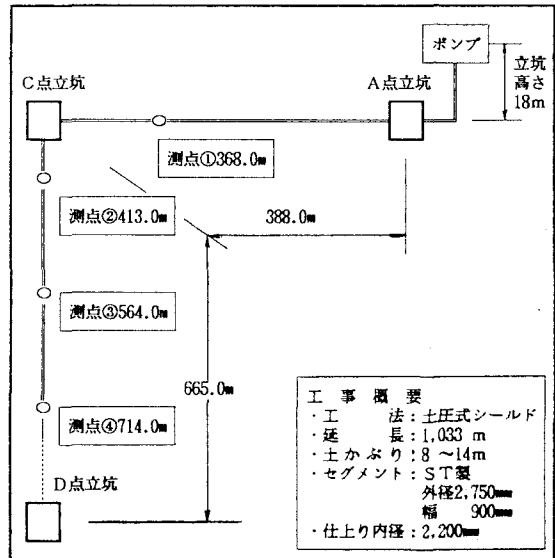


図-3 圧送実験概略図

測 点 番 号	距 離 (m)	粘 性 (cp)	ポンプ元圧 (kgf/cm ²)	材料 温度	坑内 温度	備 考
A点立坑	0.0	9,000	—	7℃	8℃	水温6℃
測点 ①	368.0	11,500	5~6	11℃	12℃	
測点 ②	413.0	14,000	13~14	12℃	17℃	
測点 ③	564.0	15,000	17~18	12℃	15℃	
測点 ④	714.0	17,000	20	14℃	17℃	
A点立坑	0.0	10,000	—	6℃	6℃	計測後

表-6 圧送距離とポンプ元圧

能である。（陶土での施工実績では10,000cpで 400m程度が圧送可能の限度である）これは、石炭灰の特徴である、粒子形状が球形に近いことによるものと考えられる。

4. 裏込注入材への適用検討

4.1 実験概要

石炭灰を用いた裏込注入材の最適配合を見つけ出すため、石炭灰は国内炭燃焼灰のフライアッシュ（江別火力発電所産）を使用して配合実験を行った。実験は、水、起泡剤、ベントナイト、石炭灰、セメント、消石灰の順に、ハンドミキサーにより混合攪拌して、C型回転粘度計で粘性を測定した。さらにフロー試験、ブリージング試験を行った。次に75%濃度のケイ酸ソーダ水溶液を投入し、ゲルタイム測定（目視観察）後、供試体の作成、養生をし、1時間、1日、28日の一軸圧縮強度試験を行った。なお、最適配合の決定にあたっての目標は、従来から使用している陶土系の裏込注入材の特性等より、次のとおり設定した。

- ① 初期粘性：1,500cp 以下
- ② フロー値：25 cm 程度
- ③ ブリージング：なし
- ④ ゲルタイム：5～10秒
- ⑤ 一軸圧縮強度(1時間)：1.5 kgf/cm²以上
- ⑥ ケイ酸ソーダ水溶液投入前の時間経過による粘性変化が小さいこと。

試料 No	配 合 (kgf)						
	セメント	ベントナイト	陶 土	石炭灰	消石灰	起泡剤	水(1ℓ)
1	300		260		40	2.0	450
2	300	30		300	20	0.0	500
3	300	30		300	20	0.6	600
4	300	30		350	25	0.6	600
5	300	30		350	20	0.6	600
6	300	30	50	400	20	0.6	600
7	300	30	50	400	20	0.9	600

表－7 各試料の配合（裏込注入材）

4.2 実験結果及び考察

表－7に各試料の配合、表－8に各試料の特性を示す。これにより裏込注入材に石炭灰を使用した場合、次のことがいえる。

- ① 陶土を石炭灰に置き換えても、裏込注入材として必要な特性及び強度が得られることが確認できた。表－9に従来の配合（陶土）と最適配合（試料No 5）の配合と特性、写真－1供試体一軸圧縮試験後の状態を示す。
- ② セメント量を一定とした場合石炭灰を少なくした配合の方がゲル体の発現強度が高い。これは、石炭灰に遅延効果があることを意味している。
- ③ 消石灰は、気泡の安定効果とゲルタイムの急結性の向上効果はあるが、ある量を超えると経

試料 No	特 性 値						備 考	通 否
	初 期 粘 性 (CP)	フ ロー 値 (cm)	ブ リ ー ジ ン グ (cm)	ゲ ル 化 (sec)	付 着 度	圧 縮 強 度 (1H) (1D)		
1	1,400	24.5×25.5	0.0	7.0	中	1.6 14.0	従来の配合	○
2	3,600	26.0×26.0	0.8	5.5	小	3.3 14.7	初期粘性大	
3	1,40	25.5×26.0	0.2	8.0	小	2.9 17.3	ブリージングあり	
4	1,600	25.0×24.5	0.0	5.5	小	2.1 16.5	経時粘性大	
5	1,300	26.0×25.0	0.0	7.0	小	2.0 15.8		○
6	1,800-2,000	26.0×25.0	0.4	6.0	小	1.5 14.7	初期粘性大	
7	1,700-1,900	27.5×27.0	0.0	7.0	小	1.7 15.2	初期粘性大	

表－8 各試料の特性（裏込注入材）

・標準配合と特性（陶土）

材料名	A	セメント	陶 土	水	起泡剤	消石灰	—	B	珪酸ソーダ	水
配合料	液	300	260	450	2.0	40	—	液	75ℓ (105)	25ℓ
特性値	・空気量：33% ・フロー値：25cm ・ゲルタイム：5秒 ・一軸圧縮強度：(1時間) 3kgf/cm ² , (1日) 13kgf/cm ² , (28日) 27kgf/cm ²									

・最適配合と特性（試料No 5）

材料名	A	セメント	石炭灰	水	起泡剤	消石灰	ベントナイト	B	珪酸ソーダ	水
配合料	液	300	350	600	0.6	20	30	液	75ℓ (105)	25ℓ
特性値	・空気量：12% ・フロー値：25cm ・ゲルタイム：7秒 ・一軸圧縮強度：(1時間) 2kgf/cm ² , (1日) 16kgf/cm ² , (28日) 54kgf/cm ²									

表－9 陶土と石炭灰の裏込注入材の配合と特性

過粘性の増大を招く。

- ④ 石炭灰は陶土に比べ粘土分が少ないため、攪拌特性は非常に良い。また、ブリージングに対する抵抗性は、石炭灰の使用量を少なくし、気泡量を上げることによって確保できるが、裏込注入材としては気泡量はできるだけ少ないが良い。

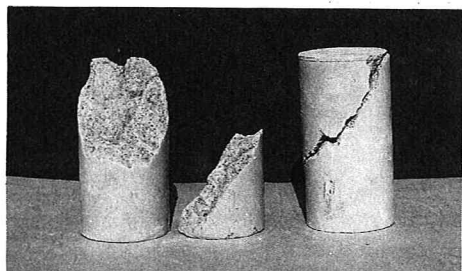


写真-1 供試体圧縮試験後の状態 (試料No.5)

5. おわりに

今回の室内実験、現場実験の結果から、粘性付与材及び裏込注入材に石炭灰を使用した配合のものでも、所定の性能が得られることがわかった。また、現場適用した、札幌市東区で施工中のシールド工事で、従来、作業性の悪かった圧送管の清掃管理、高速ミキサーにおける攪拌性等においても良好な結果が得られている。

今後は、適用工事での長期信頼性について検証していくとともに、当社の研究所である筑波フィールド技術開発センタにおいて、さらに、信頼性、経済性等の向上を図るため、新しい配合についても検討を進めていくこととする。

(参考文献)

- 1) 北海道電力株式会社 技術研究所：石炭灰の土木材料への利用，研究報告第 302号, 1982
- 2) 安保良一他：白鳥大橋築島中詰材の試験工事について，開発局技術研究発表会pp299 ～304, 1986
- 3) 橋本 司他：石炭灰パルに関する基礎的実験，土木学会第42回学術講演概要集pp846 ～847, 1987