

下水汚泥焼却灰を用いたシールド裏込め材のポンプ圧送特性

Experimental study on the backfill grout of shield tunnel using incinerated sludge

伊東三夫¹⁾・佐藤紀司¹⁾・會田好雄¹⁾・伊藤民夫²⁾・田中 弘²⁾

Mitsuo ITO, Toshikazu SATO, Yoshio AIDA, Tamio ITO, Hiroshi TANAKA

The quality of the backfill grout of shield tunnels by recycling incinerated sludge was investigated through laboratory tests and model tests. The laboratory mix tests led to a basic mix proportion to be satisfied with the quality required. The state of mixing material adhering to the inside wall of pressure tubes during grouting was also confirmed from the model tests. The test results showed that the quality of the backfill grout by recycling incinerated sludge could be maintained as the same level as the regular materials of the backfill grout.

Key Words : shield tunnel, backfill grout, recycle, incinerated sludge

1. はじめに

土木工事の現状においては、周辺環境への影響を最小限に抑制するという立場から、建設副産物の処理方法、処分場所が非常に大きな問題としてクローズアップされている。このような状況下において、資源を有効利用しようとする動きが当然のごとく活発となり、建設残土の有効利用事業など各方面で積極的な有効利用技術開発が進められている。下水道分野においては、建設残土の問題に加えて下水汚泥焼却灰の処理についても同様の問題があることから、下水汚泥焼却灰を土木材料として活用させる技術開発に取り組んでいる。

本研究では、下水汚泥焼却灰の有効活用の一つとしてシールドトンネルの裏込め材に焦点をあて、シールド掘進時に発生する掘削泥水と下水汚泥焼却灰の2つのリサイクル利用を目指した裏込め注入材の実用化に関する調査を進めている。すでにシールドトンネル裏込め注入材としての要求品質を満足する基本的な配合については調査済みであるが、かつて他機関で実施された裏込め注入材にリサイクル材を用いた試験施工において、圧送管が閉塞した事例が報告されている。^{1) 2)} 著者らが検討している下水汚泥焼却灰を用いた裏込め注入材においても、その施工性に関して同様の課題が懸念された。本報告では、下水汚泥焼却灰と泥水を用いた裏込め注入材の基本的な配合と、圧送管内の裏込め材の付着状況を施工モデル実験により検討した結果を報告する。

2. 室内配合試験

室内配合試験は、比重が異なる人工的な泥水を用いた裏込め注入材の品質確認と、さらに下水汚泥焼却灰を加えた場合における裏込め注入材の品質確認の、2段階の検討方針で実施したものである。

2. 1 裏込め注入材の要求品質

1) 正会員 東京都下水道局 管路建設部設計指導課

2) 正会員 日本工営(株) 地盤構造部

裏込め注入材は、掘進地盤の沈下防止のために、シールド掘進で生じるテールボイドに迅速かつ確実に充填されることが重要である。そこで、裏込め注入材に要求される品質としては、①良好な充填性を有すること、②流動性が良くフリージングが少ないこと、③材料分離が少なく長距離圧送が可能なこと、④早期に地山相当の強度が得られること、⑤無公害であることを主眼におき、裏込め注入材に要求する品質を表－１のように定めた。ここで、強度目標値と施工性に関わる目標値は、これまでの施工実績等を考慮して定めたものである。

表－１ 要求品質の目標スペック

項 目		目標値	目 的
Pフロー値	(秒)	11秒 以下	良好な圧送性を確保
フリージング率	(%)	3 % 以下	材料分離による管内閉塞の防止
ゲルタイム	(秒)	15秒 以下	地山への逸走、地下水による希釈防止
一軸圧縮強さ (kgf/cm ²)	初期強度	0.5kgf/cm ² 以上	地山の緩み、崩落防止
	2 8 日強度	20kgf/cm ² 以上	
重金属類の溶出試験		(環告法に準拠)	環境保全

2. 2 室内配合試験

室内配合試験は、裏込め注入材を構成する各材料の添加量を変えた試料（A液と称す）を作製し、表－１の目標スペックを満足するかを確認する方法で実施した。使用した材料の一覧を表－２に示す。人工泥水は、陶土、ベントナイトおよび水道水によって比重を調整して用いた。使用した下水汚泥焼却灰の粒度分布を図－１に示す。また、B液混合により固結させた裏込め材の溶出試験結果を表－３に示す。

表－２ 使用材料一覧

材 料		特 記
A 液	セメント系固化材	高炉セメントを主成分
	安定剤	遅延効果と分散効果
	泥 水	掘削土による泥水を模倣した人工泥水
	下水汚泥焼却灰	
B 液	3号水ガラス	ゲル化材、可塑剤、急結剤

2. 3 配合試験結果

表－４に裏込め注入材を構成する各材料配合と、A液比重、Pフロー値およびフリージング測定結果を示す。ここに示した組み合わせは、固化材（200～300kg）、泥水比重（1.1～1.3）および下水汚泥焼却灰（0～300kg）の添加量を様々に組み合わせ、目標スペックを満足したものを示したものである。

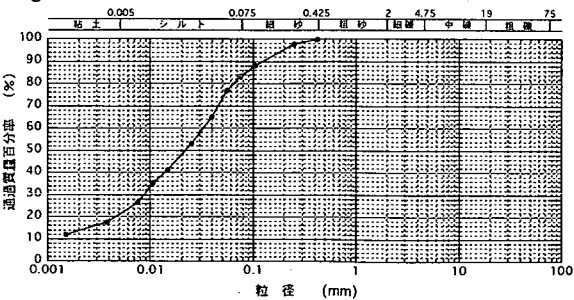
表－３ 溶出試験結果

項 目	環境基準	裏込め材
カドミウム	0.01mg/l 以下	N D
全シアン	検出されない	検出なし
有機リン	〃	検出なし
鉛	0.01以下	N D
六価クロム	0.05以下	N D
砒素	0.01以下	N D
総水銀	0.0005以下	N D
アルキル水銀	検出されない	検出なし
セレン	0.01以下	N D

N D：定量下限値を表す。

Pフロー値（流動性）とフリージングは、相反する性質であるため、試行錯誤の配合組み合わせを重ねながら得られたものであるが、結果より判断すると、固化材の添加量は概ね200～260kgに収束されるようである。一方、下水汚泥焼却灰の添加量は泥水比重の程度に応じて70～220kgの添加が可能という結果が得られた。

次節で述べるポンプ圧送による管内付着状況把握する施工モデル実験の代表配合は、表－４の配合試験結果に基づき、同じ泥水比重（1.20）の「配合A－１」と「配合B－６」とした。なお、これらの代表配合に対するゲルタイムの測定および一軸圧縮



図－１ 下水汚泥焼却灰の粒度分布

表－４ 材料配合と試験結果一覧

No.	泥水比重	配 合 (0.92m ³ 当たり)				裏込め注入材 (A液)		
		固化材 kg	安定剤 kg	泥 水 kg	焼却灰 kg	A液比重	Pフロー値 秒	フリージング [＊] %
A-1	1.20	240	2.4	1002.0	—	1.352	9.4	3.0
A-2	1.20	260	2.6	994.0	—	1.366	9.5	3.0
B-1	1.15	260	2.6	866.8	182.2	1.426	10.1	3.0
B-2	1.15	240	2.4	865.7	200.3	1.422	10.1	3.0
B-3	1.15	220	2.2	866.0	219.0	1.421	10.0	3.0
B-4	1.20	240	2.4	937.3	133.7	1.428	10.1	2.0
B-5	1.20	220	2.2	945.1	134.9	1.415	9.5	3.0
B-6	1.20	220	2.2	936.4	151.6	1.424	10.0	1.5
B-7	1.20	200	2.0	944.2	152.8	1.412	9.6	3.0
B-8	1.25	240	2.4	1009.2	66.8	1.433	10.2	1.0
B-9	1.25	220	2.2	1009.8	84.2	1.431	10.1	1.0
B-10	1.25	200	2.0	1018.1	84.9	1.418	9.6	2.0
B-11	1.25	200	2.0	1009.1	101.9	1.427	10.1	1.0

試験を実施した結果、目標値をすべて満足していることを確認している。

３．施工モデル実験

前述したように、シールドトンネルの裏込め注入材に各種のリサイクル材を用いた試験施工において、圧送管が閉塞した事例が報告されている。ここでは、泥水と下水汚泥焼却灰を裏込め注入材として用いた場合の管内閉塞状況を把握する目的で、施工モデル実験を計画した。対象とする裏込め注入材の配合は、先の室内配合試験結果に基づいて、下水汚泥焼却灰を添加した場合（表－４ No.B-6）としない場合（表－４ No.A-1）の２配合とし、ポンプ仕様、配管材等可能な限り実際の現場条件を模擬した以下の要領で実施した。

３．１ 実験方法

図－２に施工モデル実験装置の全体配置図に示す。延長５mの調査区間を循環管路系の上流部および下流部の２カ所に設定し、実験ケースごとに上下流の調査区間の観察用鋼管を一組１mずつを順次取り外し、管内の付着状況を観察できる構造とした。

各実験ケースごとの装置の主構造を以下に示す。

(１) 実験装置

管の種類：配管用炭素鋼鋼管（外径φ60.5mm×内径φ52.9mm×長さ1.0m）

圧送装置：回転数制御の一軸スクリープンプ（U4R630）

(２) 実験対象材料

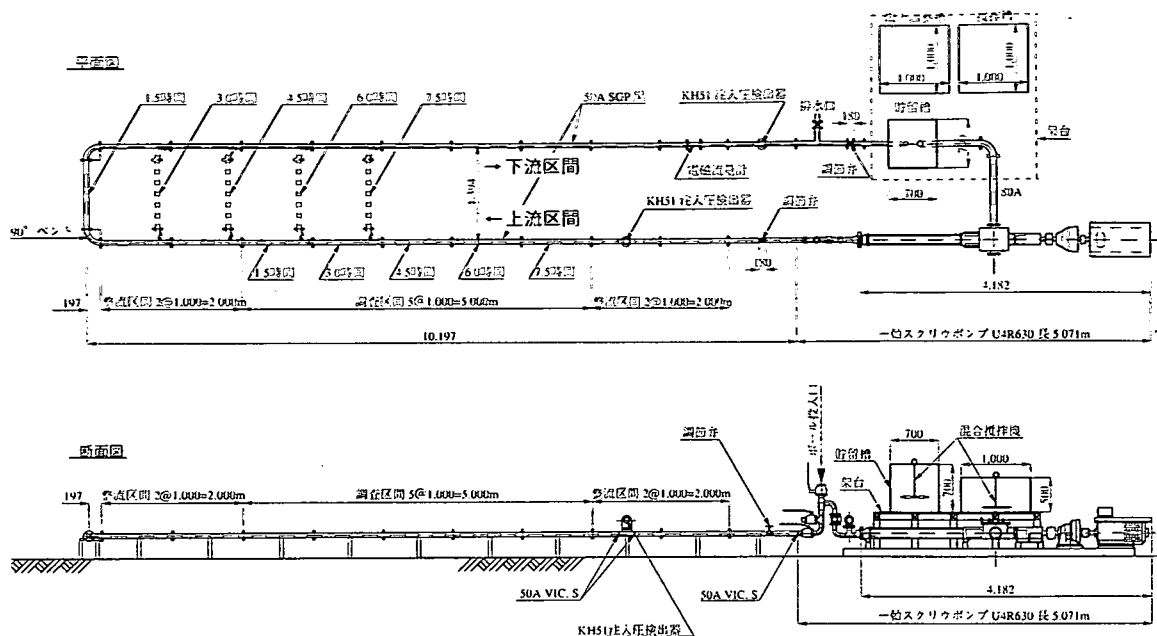
実験対象の裏込め注入材の取り扱い、①一度圧送したものは廃棄する方法、②循環させて使用する方法、の２通りが考えられる。①の場合は常に一定条件での実験となるが、非常に大量の材料が必要となり、排出される廃棄量も多くなる。一方、②の場合は時間の経過とともに材料の性質が変化することが懸念されるが、材料は少なくともすみ、

廃棄量も少なくなる利点がある。今回の対象とする材料特性を考えると可使時間が数時間～１日以上と非常に長いことから、各ケースの実験中であれば循環させることも可能と判断し、後者②の裏込め注入材を循環させる方法を採用した。

表－５ 裏込め注入材の配合表

配合	固化材 kg/m ³	安定剤 kg/m ³	人工泥水（比重：1.2）			焼却灰 kg/m ³
			陶土 kg/m ³	ベンチライト kg/m ³	水 ℓ/m ³	
A	260.9	2.6	280.5	15.4	793.4	—
B	239.1	2.4	262.1	14.4	741.3	164.8

注：ここでは、1m³当たりで表示した



図－２ 施工モデル実験装置全体図

(3) 実験条件

圧送時間および圧送流量は、実現場条件等の実績から次のように設定した。圧送時間は、１サイクル当たり９０分（圧送３０分、休止６０分）を基本とし、時間経過と付着量の関係を調査する目的の観察ケースとしては、１（継続時間：１.５時間）、２（３.０時間）、３（４.５時間）、４（６.０時間）、５（７.５時間）サイクルの５種類を設定した。また、圧送流量は、上下限値を想定し表中に示した２種類とした。実験ケース一覧を表－６に示す。

表－６ 実験ケース一覧

配合	Case-No.	圧送流量 m ³ /min	圧送サイクル (1.5時間/サイクル)	付着量調査段階
配合－Ａ	Case-1	0.034	１・２・３・４・５	各サイクル時点（模型分解型）
	Case-2	0.082	１・２・３・４・５	各サイクル時点（模型分解型）
配合－Ｂ	Case-3	0.034	１・２・３・４・５	各サイクル時点（模型分解型）
	Case-3-1	0.034	２	最終サイクル時点（模型連続型）
	Case-3-2	0.034	５	最終サイクル時点（模型連続型）
	Case-4	0.082	１・２・３・４・５	各サイクル時点（模型分解型）

(4) 測定項目

裏込め注入材性状の計測項目と計測方法を表－７に示す。

表－７ 計測項目と計測方法

計測項目	計測方法	計測段階
粘性係数	回転粘度計	各サイクル
流動性	Pフロー試験	各サイクル
せん断降伏応力	傾斜開水路模型	適時
管内付着状況	目視観察	各サイクル
	乾燥重量測定	各サイクル

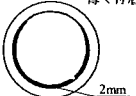
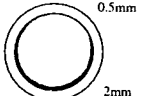
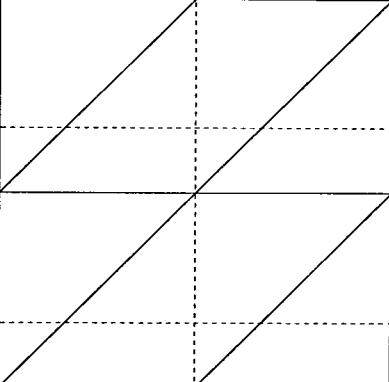
３．２ 実験結果

(1) 付着状況

各圧送サイクル終了後の、裏込め注入材の管内付着状況を図－３に示す。実験ケース１～４における付着状況をみると、配合－Ａ（Case-1、２）の場合は、圧送サイクルや圧送流量による付着状況

の違いはなく5サイクルの圧送後でも管の底部に1～2mmの付着が認められる程度であった。下水汚泥焼却灰を添加した配合－B（Case-3、4）の場合も管内の付着量はわずかであり、同一条件のもとでは概ね同じ結果を得ている。

一方、5サイクルまで圧送し続け、終了後に初めて圧送管を取り外した結果（Case-3-2）では、付着量の大きな差異が認められた。付着の様子は調査区間（区間.1～5）別でも一様とはならず、大きい所で管底部に6～7mm、管上部に2～3mmの付着量が確認された。これらの違いは、管内の付着状況の観察に際してサイクルごとに圧送管を一本ずつ取り外す場合と、最終サイクルに取り外す場合とでの、サイクル途中における管内の圧力状態が異なることと、配管ループ形状による場所的差異の発生に起因するものと考えられる。本来は、実験中の圧送管内部は一定の加圧状態であるが、前者の場合は管を取り外す時に裏込め注入材が一部漏洩するため、一時的に非加圧状態になることによる影響が考えられる。しかし、今回の実験結果によれば、付着試料は固結してはならず、管内清掃ボール等で付着物を除去する事は容易であった。したがって実現物で実施されている一般的な頻度での管内の清掃を実施しておけば、配管の閉塞はないものと判断される。

流 量		0.034m3/min		0.082m3/min	
調査区間		区間. 2	区間. 5	区間. 2	区間. 5
付 着 状 況	裏込め注入材 配合－A	付着なし  50mm 1mm	Case-1 薄く付着  2mm	付着なし  1mm	Case-2  0.5mm 2mm
	圧送サイクル (圧送時間)	2サイクル (3.0時間)	5サイクル (7.5時間)	2サイクル (3.0時間)	5サイクル (7.5時間)
	裏込め注入材 配合－B	薄く付着  1mm	Case-3  1mm 3.5mm	付着なし  1mm	Case-4 付着なし  2mm
	圧送サイクル (圧送時間)	2サイクル (3.0時間)	5サイクル (7.5時間)	2サイクル (3.0時間)	5サイクル (7.5時間)
	裏込め注入材 配合－B	付着なし  1.5mm	Case-3-1 付着なし  1.5mm		
	圧送サイクル (圧送時間)	2サイクル (3.0時間)	2サイクル (3.0時間)		
	裏込め注入材 配合－B	1mm  0.5mm	Case-3-2 2～3mm  2～3mm 6～7mm		
	圧送サイクル (圧送時間)	5サイクル (7.5時間)	5サイクル (7.5時間)		

図－3 管内付着状況

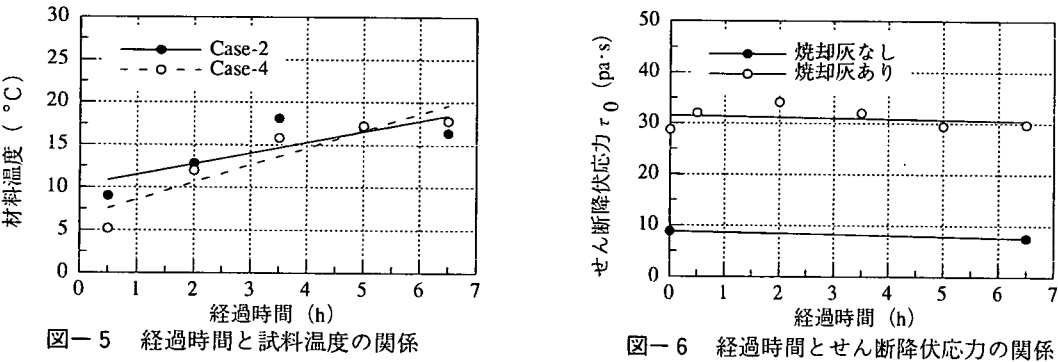
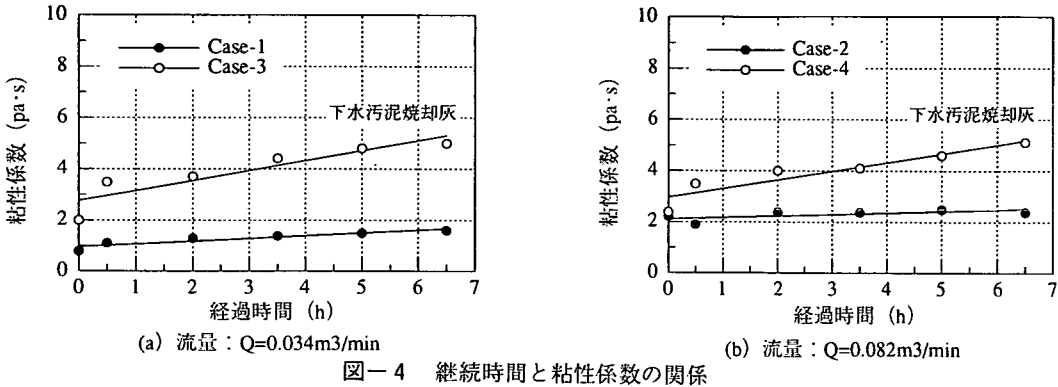
(2) 粘性係数とせん断降伏応力

粘性係数の測定は、各サイクルの圧送終了後に貯留槽から裏込め注入材の一部を取り出し、容器内で粘度計より求めた。また、せん断降伏応力は、斜面水路の上流から裏込め注入材を流下させ、流動が停止した時の厚さと水路勾配から求めた。

実験開始前および各圧送サイクルごとの粘性係数の測定結果を図－4に示す。粘性係数は継続時間とともに増加

する傾向にあり、その増加率は下水汚泥焼却灰を添加した場合（配合-B）が非常に大きくなっている。図-5に粘性係数を測定した時点の試料の温度を示す。一般的に粘性係数と温度との関係は、温度上昇に伴い粘性係数は低下するから、本実験における裏込め注入材の場合は、温度上昇による影響よりも、経時的に進行していると考えられる固結現象による影響により、粘性係数が上昇傾向を示したと思われる。また、せん断降伏応力は管内付着状況に影響を与える要因であるが、今回の裏込め注入材においては、図-6に示すように時間経過に関わらず概ね一定値を示していた。その結果、施工モデル実験でも顕著な付着が認められなかったと解釈できる。

逆にいえば、せん断降伏応力が経過時間とともに大きくなる材料は、管内の閉塞を招く恐れがあり望ましい材料とは言えないことになるが、今回はこのような閉塞の原因を究明する観点からの実験は実施していない。



4. まとめ

室内配合試験結果および施工モデル実験結果から判断して、泥水と下水汚泥焼却灰の2種類のリサイクル材を添加した裏込め注入材は、一般に使用される裏込め注入材と同等の品質と施工性を有することが明らかとなった。ただし、今回手がけた施工モデル実験では、実験手法の違いにより裏込め注入材の付着程度が異なることも把握されたため、今後、より現実に近い施工モデル実験手法の改良と、実験条件の改善を行い、材料特性ならびに付着状況をさらに明確にするとともに、下水汚泥焼却灰の有効利用の実現化に向けて調査を進めていく予定である。

最後に、本成果は山本稔委員長（東京都立大名誉教授）の御指導による（社）日本トンネル技術協会シールド工事裏込め材特別委員会での検討内容の一部である。ここに、委員各位の御指導御協力に対し謝意を表します。

参考文献

- 1) 米田治、出光恵、小泉一人：石炭灰のシールド裏込め注入材への適用、トンネル工学研究発表会 論文・報告集 第3巻 pp.239-244 1993年
- 2) 大竹昌志、小林康雄、大越一朗：可塑性グラウトの長距離圧送特性と充填性、土木学会第51会年次学術講演会 第3部 pp.292-293 1996年