

報告 下水汚泥溶融スラグを用いた充填モルタルのポンプ圧送性

松本典人^{*1}・佐野清史^{*2}・田原増己^{*3}・三品文雄^{*4}

要旨: 下水汚泥の有効利用の一環として、下水汚泥溶融スラグをシールド坑内に用いる充填モルタルの細骨材として適用した。充填モルタルは、特にポンプ圧送性が要求されたが、下水汚泥溶融スラグの一部を海砂に置換し細骨材全体の粒度分布を改善し、かつ AE 減水剤を適量使用することにより、良好なポンプ圧送性が得られた。実施工においても、充填モルタル打込み時に配管内での閉塞等のトラブルもなく、所要の品質を有するモルタルを圧送供給できた。

キーワード: 下水汚泥溶融スラグ、細骨材粒度分布、ポンプ圧送性、流動性

1. はじめに

我が国の下水汚泥発生量は、下水道普及率の向上および下水処理の高度化に伴い増加している。現在、下水汚泥の大部分が埋立処分されているが、埋立処分地の確保が次第に困難となり、また、このことが処理処分費の高騰につながる事が予想される。一方、地球環境問題の観点から産業廃棄物の再資源化に対する社会的要請も高まっており、下水汚泥の処理処分は、埋立処分という一過型から下水汚泥を建設資材などに有効利用することで長期的安定的な処分が可能である循環利用型への移行が進められている。

下水汚泥の有効利用方法として、下水汚泥処理によって生成する焼却灰のレンガや土質改良材、コンポスト等の肥料や土壌改良材への利用などが実用化されており、焼却灰や溶融スラグを加工して骨材などへの利用も進められている¹⁾。

本稿は、写真-1 に示すように、土による埋め戻しが困難なシールド坑内を充填するセメント・ベントナイトモルタル(以下、充填モルタル)の細骨材に下水汚泥溶融スラグを多量(50%以上)に使用することを検討目的として、充填モルタルの配合検討を行った結果および施工記録について報告する。

2. 充填モルタルの仕様

充填モルタルの要求品質は、下水処理圧送管が敷設されている坑内を充填できる流動性および材料分離抵抗性を併せ持つこと、および陸上にあるプラントから立抗を通して坑内まで、最長約700mの長距離かつ高低差最大20mの鉛直落下を含めたポンプ圧送においても圧送前後の品質の変動が小さいことである。

充填モルタルの管理基準は、モルタルフローが $180\pm 20\text{mm}$ (KODAN-305 シリンダー法)、ブリーディング率(JSCE-F522, 試験開始3時間後)が3%以下、および圧縮強度が現地盤と同程度の $0.2(\text{N}/\text{mm}^2)$ 程度を目標とした。

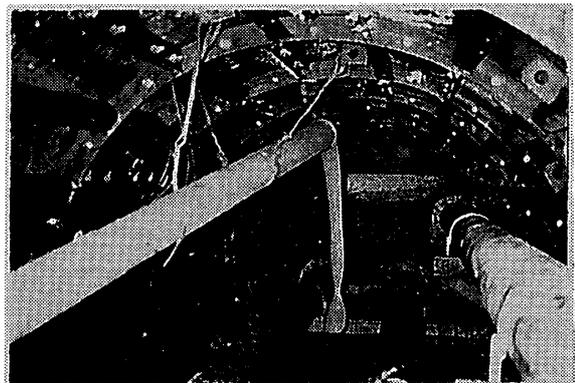


写真-1 シールド坑内の充填モルタル打込み状況

*1 東洋建設(株)鳴尾研究所材料研究室研究員 (正会員)

*2 東洋建設(株)鳴尾研究所材料研究室長 (正会員)

*3 日本下水道事業団大阪支社大阪南広域事務所工事課長

*4 日本下水道事業団大阪支社大阪南広域事務所所長

表-1 下水汚泥溶融スラグの化学組成
および溶出試験結果例³⁾

項目	単位	試験結果	
化学組成	%	Al ₂ O ₃	15.1
		CaO	22.1
		Na ₂ O	0.2
		Fe ₂ O ₃	10.8
		MgO	2.5
		MnO ₂	0.5
		P ₂ O ₅	16.8
		K ₂ O	1.1
		SiO ₂	27.9
		Na ₂ O	1.2
		TiO ₂	0.8
		溶出試験	mg/l
カドミウム	<0.01		
六価クロム	<0.05		
総水銀	<0.0005		
アルキル水銀	<0.0005		
鉛	<0.01		
シアン	<0.1		
PCB	<0.0005		
有機りん	<0.1		
銅	<0.3		
マンガン	<1		
亜鉛	<0.5		

表-2 使用材料

項目	仕様
セメント	高炉セメントB種 比重:3.04, 比表面積:4070cm ² /g
ベントナイト	比重:2.40
下水汚泥溶融スラグ	比重: 2.83, 吸水率: 0.83% 粗粒率: 3.58
海砂	比重: 2.57, 吸水率: 2.13% 粗粒率: 1.90
AE減水剤	リグニンスルホン酸化合物
増粘剤	低界面活性型水溶性セルロース エーテル 2%水溶液 10000cp

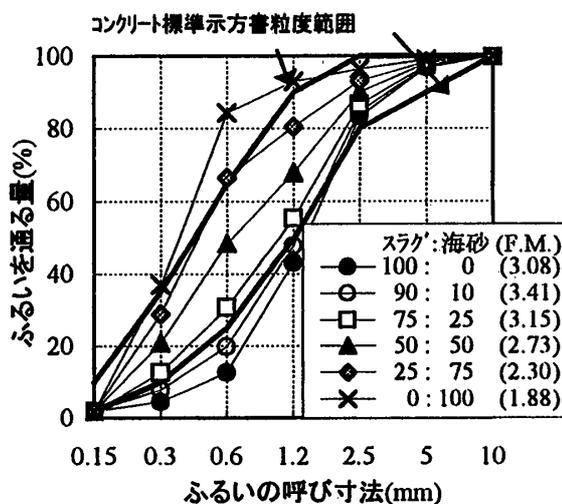


図-1 骨材の粒度分布

3. 使用材料

本実験では、下水汚泥を高温下(1300~1400°C)で融液の状態にし、水で急激に冷却することで得られる粒子の細かい水砕スラグ²⁾を用いた。この下水汚泥溶融スラグは、表-1 に示すように、ケイ素・カルシウム・アルミニウムの酸化物に加え、下水汚泥中に多く含まれるリンの酸化物などを含んだガラス質の物質であり、また有害な重金属の溶出もほとんど認められていない³⁾。

下水汚泥溶融スラグの物理特性を含めた充填モルタルの使用材料を表-2 に示す。下水汚泥溶融スラグは、吸水率が海砂に比べて小さく、粗粒率が大きい。

下水汚泥溶融スラグ、海砂およびこれらを混合した場合(容積比)の粒度分布を図-1 に示す。下水汚泥溶融スラグは0.6mm以下の細粒分が少なく、土木学会「コンクリート標準示方書」で定める細骨

材の粒度範囲外にある。しかし、0.6mm以下の細粒分が多い海砂を混合することによって、標準的な粒度分布を確保できる。

なお、充填モルタルの所要の流動性、材料分離抵抗性および強度を確保するため、充填材として実績の多いセメントおよびベントナイトを使用した。また増粘剤はセルロース系のもの⁴⁾を使用した。

4. 実験概要

4.1 実験要因

充填モルタルの材料分離抵抗性と流動性の保持特性の向上を目的として次のような実験要因を選定した。

(1) 骨材の仕様

下水汚泥溶融スラグは、通常の細骨材に比べて粗粒率が大きく保水性が小さいため、下水汚泥溶融スラグと海砂を混合して粒度調整を行った場合

表-3 検討した充填モルタルの配合

	細骨材混合比 スラグ:海砂	W/C (%)	単 位 量 (kg/m ³)					AE 減水剤 (C×%) ^{*)}	増粘剤 (g/m ³)
			水	セメント	ベントナイト	熔融スラグ	海砂		
1	100:0	597	567	95	155	954	—	—	—
2	90:10				154	860	87		
3	75:25				153	719	216		
4	50:50				150	481	434		
5	25:75				148	241	655		
6	0:100				145	—	879		
7	50:50	597	567	95	150	481	434	1.0	—
8								2.0	
9								4.0	
10								6.0	
11	100:0	597	567	95	150	481	434	—	200
12								—	400

*)AE 減水剤は 4 倍溶液を使用

の充填モルタルの性状を調べた。両者の混合割合は、容積比で(下水汚泥熔融スラグ:海砂)=(100:0), (90:10), (75:25), (50:50), (25:75), (0:100)の 6 水準とした。

(2) AE 減水剤の使用

充填モルタルの製造からポンプ圧送、充填および配管清掃などの現場条件から、充填モルタルのフレッシュ性状(モルタルフロー=180±20mm)を 1 時間程度確保する必要があったため、その保持特性を高める方法として AE 減水剤の適用性を調べた。AE 減水剤添加量(4倍液)は、C×0, 1, 2, 4, 6(%)の 5 水準とした。

(3) 増粘剤の使用

充填モルタルの材料分離抵抗性を高める方法として、増粘剤の適用性を検討した。増粘剤添加量は、増粘剤系高流動コンクリートで使用されている添加量を参考にして、0, 200, 400(g/m³)の 3 水準とした。

4.2 検討した充填モルタルの配合

充填モルタルの配合を表-3 に示す。配合 No.1 ~6 において、下水汚泥熔融スラグを 100%用いた配合 No.1 (モルタルフロー=187mm, 圧縮強度 $f_c'28=0.45(N/mm^2)$)を基本として、配合 No.2~6 は、所要のモルタルフローが得られるよう単位ベントナイト量を調整した。これは、骨材以外の配合要素

表-4 試験項目および方法

項目	方法
モルタルフロー試験	KODAN-305
モルタルフローの保持特性	モルタル製造直後, 0,30,60 分後にフロー試験
ブリーディング試験	JSCE-F522 (500ml メスシリンダ [*] を使用)
加圧ブリーディング試験	JSCE-F502

が同じ場合、海砂の混合比が高くなるに伴いモルタルの粘性が高まりモルタルフローが小さくなったためである。また、ベントナイトは、その吸水・膨潤作用によって充填モルタルに粘性を付与すること、セメントの水和反応に直接関与しないため圧縮強度に与える影響が小さいことから単位ベントナイト量でモルタルフローを調整した。

配合 No.7~12 は、配合 No.4 の充填モルタルを基本にして、AE 減水剤および増粘剤の添加がモルタルのフレッシュ性状に与える影響を調べた。

4.3 試験項目と方法

試験項目と方法を表-4 に示す。充填モルタルの品質について、ポンプ圧送における材料分離抵抗性の指標として有効な加圧ブリーディング試験、ブリーディング試験および流動性の時間変化を評価項目とした。

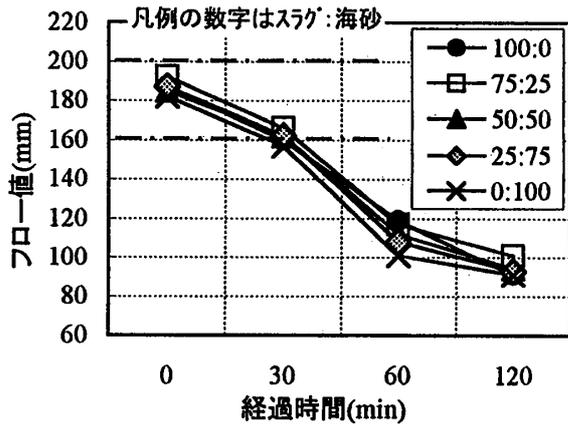


図-2 骨材混合比とモルタルフロー保持特性の関係

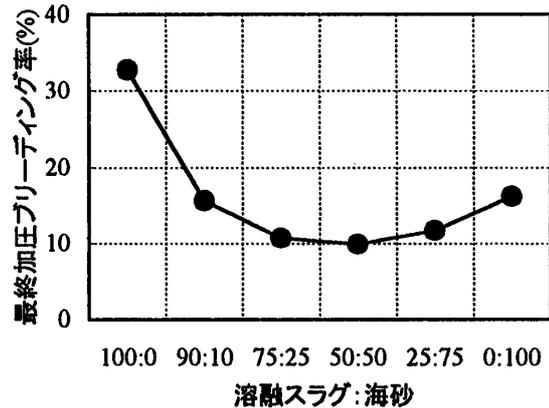


図-4 骨材混合比と加圧ブリーディング率の関係

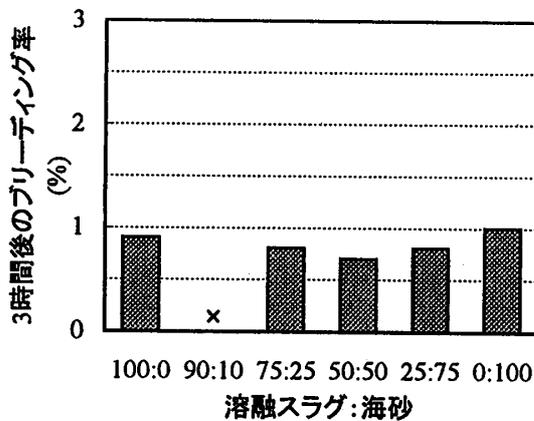


図-3 骨材混合比とブリーディング率の関係

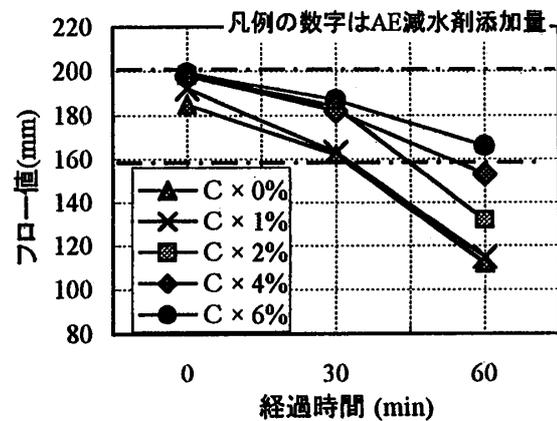


図-5 AE 減水剤添加量とモルタルフロー保持特性の関係

5. 実験結果

5.1 骨材の仕様による性状の変化

(1) 流動性および保持特性

骨材中の下水汚泥溶融スラグと海砂の混合比がモルタルフローの保持特性に与える影響を図-2に示す。下水汚泥溶融スラグと海砂の混合比によらず、モルタルフロー値は時間経過とともに低下し、特に30分から60分の間での低下率が大きい結果となった。

(3) 材料分離抵抗性

下水汚泥溶融スラグと海砂の混合割合がブリーディング率および加圧ブリーディング率に与える影響を図-3および図-4に示す。ブリーディング率および加圧ブリーディング率ともに下水汚泥溶融スラグと海砂の混合比が50:50の場合が最も小さくなった。また、下水汚泥溶融スラグを100%使用した場合は、他のケースに比べて加圧ブリーディ

ング率が2倍以上となった。このおもな要因として、前者については、図-1に示すように、細骨材全体でみた粒度が均一に分布しており、モルタル中の細骨材が最も密実に配列され、水の移動が抑制されたことが考えられる。後者は、下水汚泥溶融スラグの細粒分が少なく吸水率が小さい材料特性によるものと考えられた。長距離ポンプ圧送において、加圧による材料分離抵抗性を考慮すると、海砂をある程度混合するのが望ましいと考えられた。

5.2 AE 減水剤添加による性状の変化

(1) 流動性

AE 減水剤添加率とモルタルフローの保持特性の関係を図-5に示す。AE 減水剤を添加することによって、練上り直後のモルタルフローは、添加量C×2%まで大きくなったが、C×2%以上になると変化しなかった。モルタルフローの保持特性は、AE 減水剤添加率の増加に伴い向上し、特に練上

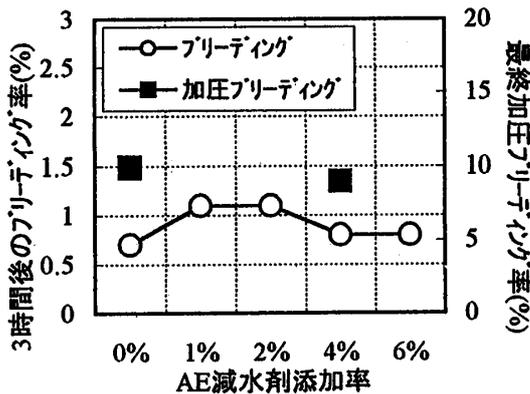


図6 AE 減水剤添加量と(加圧)ブリーディング率の関係

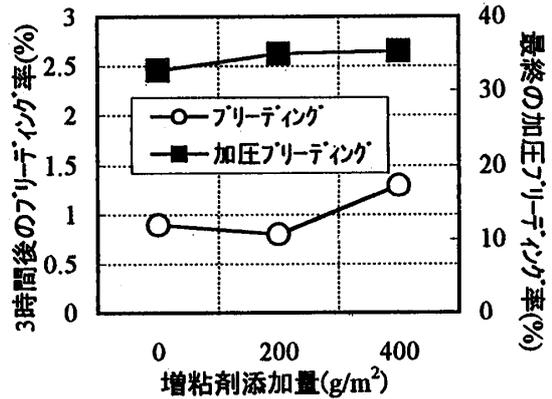


図8 増粘剤添加量と(加圧)ブリーディング率の関係

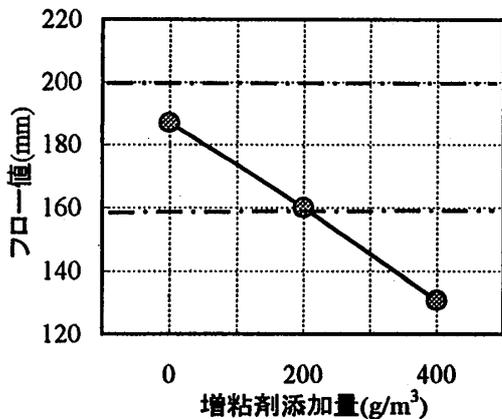


図7 増粘剤添加量とモルタルフローの関係

り後 60 分後の結果に顕著にその傾向が現れた。また、C×4% 以上添加すると 60 分後まで所要のモルタルフローがほぼ満足できた。AE 減水剤は、本来セメントの分散性を高めることによって、同一スランブを得るための単位水量の削減などを目的に使用されるが、多量に用いることによって、セメントの水和反応を遅らせ、流動性の保持特性を高める効果もあることが確認できた。

(2) 材料分離抵抗性

AE 減水剤添加率とブリーディング率および加圧ブリーディング率との関係を図-6 に示す。AE 減水剤の添加がブリーディングおよび加圧ブリーディング率に与える影響は小さいことがわかった。

3.3 増粘剤添加による性状の変化

(1) 流動性

増粘剤添加率とモルタルフローの関係を図-7 に示す。増粘剤添加量の増加に伴いセメントペーストの粘性が大きくなり、モルタルフローは小さくなっ

た。

(2) 材料分離抵抗性

増粘剤添加量とブリーディング率および加圧ブリーディング率の関係を図-8 に示す。本仕様の充填モルタルにおいて、増粘剤の添加量が高流動コンクリートで使用される程度の少量である場合、ブリーディング率および加圧ブリーディング率の顕著な差異は認められなかった。したがって、少量の増粘剤添加による加圧時の材料分離抵抗性の向上は図れないものと考えられた。

6. 実施工

シールド発進立杭から到達立杭まで全長 1360m、内径φ1744mm のシールド坑内への充填モルタルの打込みは、発進、到達の両立杭からそれぞれ陸上に設置した連続ミキサで充填モルタルを製造した後、ポンプ圧送によって行った。ポンプ圧送距離は、片側プラントから立杭を通過して坑内まで 20m の鉛直落下を含めて最長で片側が約 700m となる。

6.1 実施工で用いた充填モルタルの配合

実施工で用いた充填モルタルの配合を表-5 に示す。できるだけ多くの下水汚泥溶融スラグを有効利用するために、上述の実験結果を鑑みて圧送距離によって充填モルタルの配合、すなわち下水汚泥溶融スラグと海砂の混合率を設定した。また、充填モルタルのフレッシュ性状を 1 時間程度保つため、AE 減水剤を 4 倍液で C×4% 添加した。

表-5 実施工で用いた充填モルタルの配合

圧送距離 (m)	細骨材混合比 スラグ:海砂	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)				AE 減水剤 (Cx%) ^{*)}	
			水	セメント	ベントナイト	溶融スラグ		海砂
0~100	100:0	597	567	95	155	954	—	4.0 (4倍溶液)
100~200	90:10				154	860	87	
200~400	75:25				153	719	216	
400~700	50:50				150	481	434	

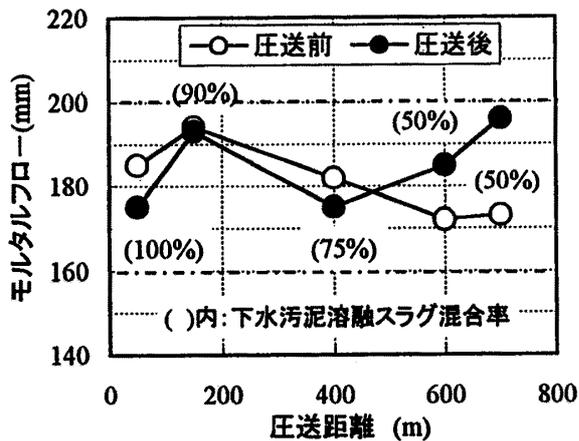


図-9 モルタルフローの品質管理試験結果例

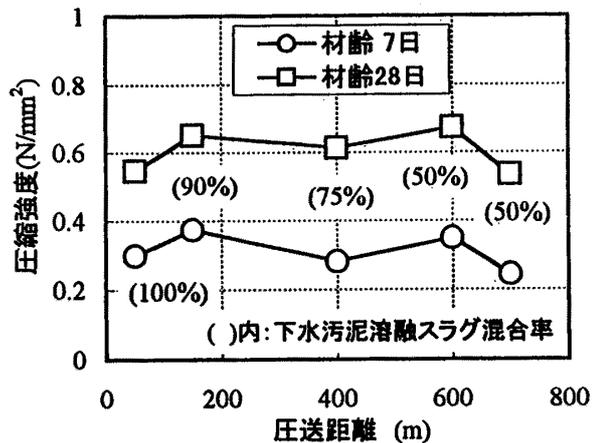


図-10 圧縮強度の品質管理試験結果例

6.2 充填モルタルの品質管理試験結果

充填モルタルの品質管理試験結果として、ポンプ圧送前後のモルタルフローおよび圧縮強度の一例をそれぞれ図-9 および図-10 に示す。充填モルタルは、ポンプ圧送距離が 600m 以上になるとモルタルフローが圧送後に大きくなる傾向を示したものの、いずれの配合も圧送距離および圧送前後に関わらず所要の流動性および分離抵抗性を確保できた。また、配管の切替え、配管清掃による管閉塞を生じることなく、良好なポンプ圧送性を有していた。圧縮強度は、若干目標強度より大きくなったが、ばらつきは小さかった。

7. まとめ

土による埋め戻しが困難であるシールド坑内に使用する充填モルタルの細骨材に下水汚泥溶融スラグを多量に使用することを目的として充填モルタルの配合検討を行った結果、下水汚泥溶融スラグと海砂を混合して粒度調整を行うことで良好な長距離ポンプ圧送性を確保でき、AE 減水剤の添加により良好な保持性能を付与することができた。

また、圧送距離に応じて下水汚泥溶融スラグの混合比(50~100%)を設定することで、より多くの下水汚泥溶融スラグを有効利用できた。

参考文献

- 1) 渡部春樹:下水汚泥の骨材への利用, コンクリート工学, Vol.34, No.7, pp104-105, 1996.7
- 2) 三品文雄・小池哲夫:大阪南エースセンターにおける下水汚泥の資源化, 再生と利用, Vol.20, No.74, pp15-24, 1997.10
- 3) 大阪南エースセンターの下水汚泥溶融水砕スラグについて, 日本下水道事業団大阪南広域事務所, 1997.10
- 4) 例えば, 松本典人・佐野清史・宮川豊章・藤井學:増粘剤系高流動コンクリートの耐久性に関する一考察, セメント・コンクリート論文集No.50, pp594-599, 1996.12
- 5) トラン デュク フィ オアン・広永道彦・遠藤孝夫・島部賢一郎:ベントナイト, アスファルトを添加したコンクリートの基本性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.1, pp729-734, 1994.6