

気泡モルタル用混和材としてのペーパースラッジの利用に関する研究

阿部 孝行, 北辻 政文*

A Study on Utilization of Paper Sludge as Admixtures for Air Mortar

Takayuki ABE and Masafumi KITATSUJI*

Abstract

In this study, for the purpose of efficient use of paper sludge which was industrial waste generated from paper manufacturing company, we verified the characteristic and utility of air mortar that used paper sludge as admixture. After the filling material had been set as a usage, basic physical properties, durability, and the segregation resistance were confirmed by the indoor examination and the practicality was examined on the construction site. As a result of the indoor examination, it was confirmed that a basic performance as the filling material was satisfied enough, and deterioration because of the dry-wet resistance and the freeze-thaw resistance was not seen. In addition, the improvement of the segregation resistance was greatly seen compared with usual air mortar. Similar characteristic was demonstrated in the just construction site, and the improvement of construction was seen. Therefore, the paper sludge could be considered to be useful as the mixture material for the air mortar

(Received November 2, 2009 ; Accepted February 1, 2010)

Keywords : industrial waste, paper sludge, air mortar, durability, segregation resistance

キーワード : 産業廃棄物, ペーパースラッジ, 気泡モルタル, 耐久性, 分離抵抗性

1. はじめに

わが国の近代化は、国民の生活レベルの向上と多様なアメニティーを生みだしたが、同時に、大量の廃棄物をもたらしている。2006年現在、わが国の産業廃棄物の総排出量は年間約4億トン¹⁾である。2000年に「循環型社会形成推進基本法」が制定され、リサイクル推進に向けた各種法整備が行われたにも拘わらず、この量は10年間で変わっていない。

一方、2005年における最終処分場の残余年数は7.7年程度と短く¹⁾、このままの状況では廃棄物が行き場を失うことになる。そのため、廃棄物の減容化、リサイクル化が、わが国の緊急的課題である。

パルプ・紙製造業においても例外ではなく、年間約3,300万トンの産業廃棄物が発生しており、その量は、わが国の全発生量の約8%を占めている¹⁾。それらの大

部分はペーパースラッジ（以下、P Sという）と呼ばれる有機性汚泥である。本業界では、廃棄物の削減に取り組んでおり、最終処分場への処分量は減少傾向にあるものの、その大部分は焼却によるエネルギー回収となるため、地球温暖化ガスの発生や燃焼後に発生する焼却残渣の処理に課題が残っている。焼却残渣の大半はセメント原料として再利用されているが、それにかかる費用も膨大なため、新たな用途開発が望まれている。

セメント原料以外の用途研究として、粒状炭化物を製造し農業資材（土壌改良資材）としての利用²⁾、P S灰の盛土材としての利用³⁾などが報告されている。しかし、P Sが難燃性であること⁴⁾や焼却による二酸化炭素排出などの環境面を考慮すると、排出されたP Sをそのままで価値を見出し使用することが効率的であると

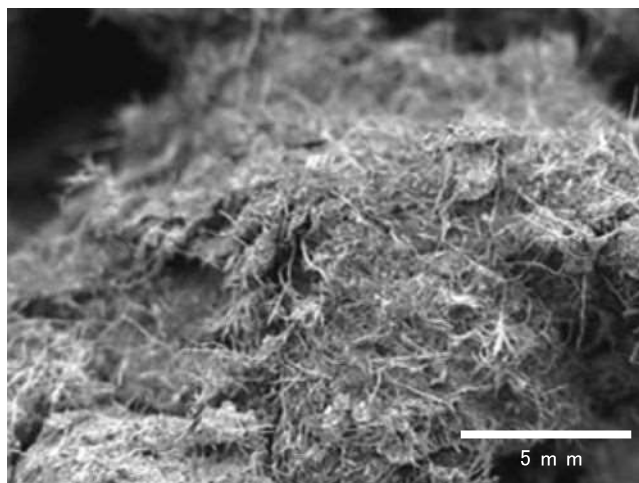
* Corresponding author (E-mail : kitatsuj@myu.ac.jp)

考えられる。従来からパルプ廃材を有姿のままで利用する方法として、パルプ廃液の混和剤としての利用⁵⁾、セメントモルタルへのセルロースの利用がある⁶⁾。

一方、気泡モルタルとは、セメント、水および気泡を混合したものであり、必要によっては細骨材が混合される。軽量性や流動性に優れており、充填材や軽量盛土材として利用されている。Foamed Cement Banking Method (FCB工法)は気泡モルタルを盛土に用い、軽量化した工法で道路建設において数多くの施工実績がある⁷⁾。

気泡モルタルには、独立した微細な気泡と、その分散性および安定性が必要である。しかし、現状では気泡の一部が混合時や圧送時に消えてしまうため、その低下分を見込んで気泡の割増施工を行っている⁷⁾。これらの割増された気泡は打設後においても圧力の影響を受け固化するまでに体積変化を起こす⁸⁾ため、再充填や打設高さの制限が発生する。さらに、降雨時には、せっかく発泡したものが雨水圧により消えてしまい打設することが困難などの課題がある。つまり、気泡モルタルは混入している気泡により軽量性や流動性といった特徴を有する反面、混合、圧送時や自重による圧力、降雨や滞水に対して気泡が維持できないというのが現状である。

そこで本研究では、パルプ・紙製造時に発生する廃棄物、P Sの低減を目的に、P Sを気泡モルタル用混和材として利用する場合の課題、物性および現場での施工性の評価について検討を行った。



図－1 ペーパースラッジの外観

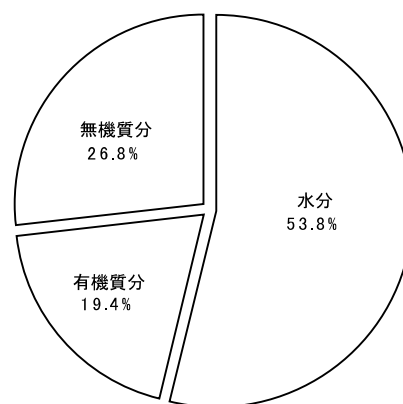
2. 材料と方法

2.1 ペーパースラッジ (P S) について

P Sは製紙工程で発生する副産物であり、紙にできない短繊維や紙の表面にコーティングされていた填料などを含んだものである。図－1にP Sの拡大写真を示す。

2.1.1 P Sの組成

本研究に用いたP Sの組成を図－2に示す。P Sは、水分約54%、無機質分約27%、有機質分約19%で、無機質分は紙の不透明度と白色度を高めるために表面に塗布工する填料、有機質分は木質系のセルロースやリグニンなどである。このP Sの組成比は年間を通じて概ね一定である。



図－2 ペーパースラッジの組成

2.1.2 P Sの安全性

P Sが気泡モルタルの混和材として利用されるためには、その品質とともに安全性が確保されなければならない。すなわち、有害物質の溶出量が環境基準値以下でなければならない。表－1にP Sの溶出試験結果を示す。環境基準については、土壤環境基準（環境庁告示第46号）を判定基準とし表記した。P Sは、すべての項目において基準値以下であり、環境へ与える負荷は極めて小さいといえる。

2.2 使用材料

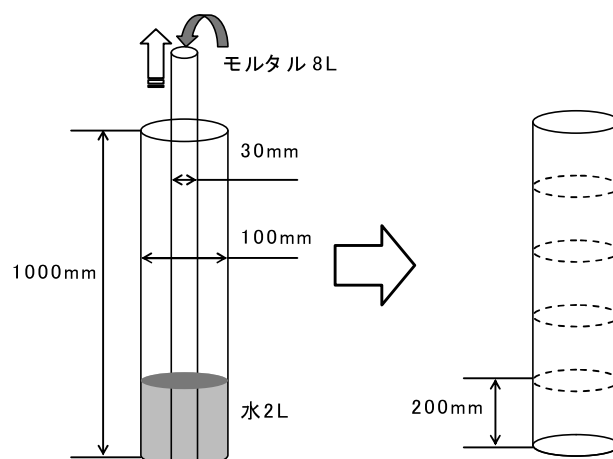
セメントには普通ポルトランドセメント（密度 3.16 g/cm^3 ）を使用した。P Sは密度 2.12 g/cm^3 、含水率54%のものを使用した。細骨材には山砂（表乾密度 2.58 g/cm^3 ）を用いた。起泡剤は蛋白質系のもの（密度 1.16 g/cm^3 ）を使用した。

表－１ ペーパースラッジからの有害物溶出試験結果

計量物質	単位	ペーパースラッジ	土壤環境基準
カドミウム	mg/l	0.005未満	0.01以下
全シアン	mg/l	0.01未満	検出されないこと
有機磷	mg/l	0.1未満	検出されないこと
鉛	mg/l	0.001未満	0.01以下
六価クロム	mg/l	0.01未満	0.05以下
砒素	mg/l	0.004未満	0.01以下
総水銀	mg/l	0.0005未満	0.0005以下
アルキル水銀	mg/l	0.0005未満	検出されないこと
PCB	mg/l	0.0005未満	検出されないこと
ジクロロメタン	mg/l	0.002未満	0.02以下
四塩化炭素	mg/l	0.0002未満	0.002以下
1,2-ジクロロエタン	mg/l	0.0004未満	0.004以下
1,1-ジクロロエチレン	mg/l	0.002未満	0.02以下
トリス-1,2-ジクロロエチレン	mg/l	0.004未満	0.04以下
1,1,1-トリクロロエタン	mg/l	0.0005未満	1以下
1,1,2-トリクロロエタン	mg/l	0.0006未満	0.006以下
トリクロロエチレン	mg/l	0.002未満	0.03以下
テトラクロロエチレン	mg/l	0.0005未満	0.01以下
1,3-ジクロロプロペン	mg/l	0.0002未満	0.002以下
チウラム	mg/l	0.0006未満	0.006以下
シマジン	mg/l	0.0003未満	0.003以下
チオベンカルブ	mg/l	0.0003未満	0.02以下
ベンゼン	mg/l	0.001未満	0.01以下
セレン	mg/l	0.001未満	0.01以下
フッ素	mg/l	0.15未満	0.8以下
ホウ素	mg/l	0.1未満	1以下
砒素及びその化合物	mg/kg乾量	0.1未満	15未満
銅	mg/kg乾量	0.7	125未満

表－２ 配合 (1 m³あたり)

	セメント	ペーパースラッジ	砂	水	空気量	W/C
	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(%)	(%)
PS気泡モルタル	600	100	—	407	35	67.8
エアミルク	650	—	—	441	35	67.8
エアモルタル	535	—	532	271	35	50.7



図－３ 材料分離試験方法

2.3 試験配合および供試体の作製方法

本研究における配合設定では、事前の練り合わせ試験結果からPSの混合量を1 m³あたり100kg配合したものを選定した。PSを用いた気泡モルタル、比較したエアミルク、エアモルタルの配合を表－2に示す。

PSを用いた気泡モルタルの練り混ぜは、はじめにPSを練り混ぜ水に投入し1分間攪拌、その後、セメントを投入し3分間攪拌、最後に発泡装置より独立気泡を投入した。エアミルク、エアモルタルに関しては通常の製造方法に従った。圧縮強度、乾湿繰り返し試験および凍結融解試験の供試体はφ100×200mmの円柱、曲げ強度試験は40×40×160mmの角柱とした。養生はすべて20℃の恒温室における気中養生とした。

2.4 試験項目および試験方法

試験項目は、湿潤密度試験（重量法）、フロー値測定（JHS A 313）、ブリーディング試験（J S C E - F 522）、沈下量試験（φ150mm×300mm型枠に充填して測定）、圧縮強度試験（JIS A 1108）、曲げ強度試験（JIS A 1149）、乾湿繰り返し試験「建設汚泥の高度処理利用技術の開発」に準拠）、凍結融解試験（JHS 215）である。

また、材料分離抵抗性は滞留水中における施工を想

定した実験により確認した。図－3に示す内径100mm、高さ1,000mmの塩化ビニル製容器に予め2 lの水を入れ、容器の中心に内径30mmのトレミー管を容器の底まで挿入し、トレミー管を少しずつ上昇させながら約8 lのモルタルを充填した。硬化後、長さ200mm間隔に切断し、それぞれについて見掛け密度、圧縮強度を測定した。比較実験として、PSを用いた気泡モルタルの他に、水セメント比と空気量を一定としたエアミルクおよび空気量を一定とし、セメント砂比を1：1としたエアモルタルの2配合の供試体も作製した。

乾湿繰り返し試験の乾湿条件は、40℃乾燥2日、20℃水に浸せき1日の合計3日を1サイクルとし、10サイクル繰り返した。凍結融解試験の凍結融解条件は－23℃凍結24時間、20℃水中融解24時間の合計2日を1サイクルとし、12サイクル繰り返した。

ブリーディング試験および沈下量試験は、それぞれ3、20時間後に実施し、圧縮強度試験、曲げ強度試験に関しては材齢7、28日に行った。乾湿繰り返し試験、凍結融解試験は材齢28日の供試体を使用した。

3. 結果と考察

3.1 フレッシュモルタルの性状と強度特性

フレッシュモルタルの性状と強度特性の結果を表－

表-3 試験結果

試験項目	試験値	
密度(g/cm ³)	1.13	
フロー値(mm)	222	
圧縮強度 N/mm ²)	材齢 7日	2.76
	28日	4.30
曲げ強度 N/mm ²)	材齢 7日	1.16
	28日	1.64
ブリーディング率(%)	3時間後	0
	20時間後	0
凝結沈下量(%)	3時間後	0
	20時間後	0

3に示す。ブリーディングが著しい場合、上部が多孔質になり弱層を形成するなど、均一性を求められるモルタルには致命的な欠陥となる。P Sを混合したモルタルでは3および20時間後ともにブリーディングは見られなかった。その理由としては、吸水率が大きく親水性が高い繊維質がモルタル内の水の移動を抑制したためと考えられる。また、硬化に伴う収縮も認められず体積変化はないと判断された。

圧縮強度は、若干の強度低下がみられた。この理由は、有機質に含まれている水分が練り水として供給され、水セメント比が高くなることによると考えられる。また、曲げ強度は一軸圧縮強度に対して4割近くの数値を示し、一般のモルタルに対して曲げ強度の割合が高いことから、若干ではあるがP Sに含まれるセルロース繊維質による曲げじん性が付与されたと考えられる。

3.2 乾湿繰り返し試験

気泡モルタルの用途によっては、降雨、乾燥などの気象作用による細粒化現象や地下水などによる浸食等

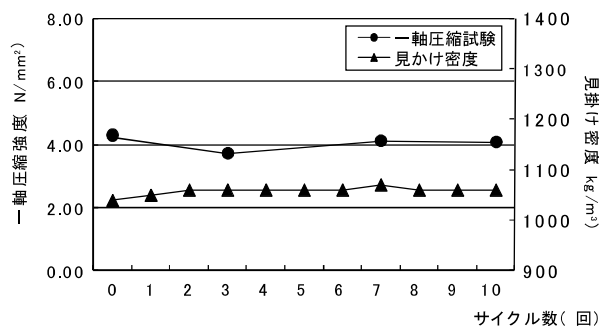


図-4 乾湿繰り返し試験結果

を受けることが想定される。これらの作用に対する抵抗性を把握するために、乾湿繰り返し試験を行った。サイクル数と見掛け密度および一軸圧縮強度試験の結果を図-4に示す。

この図から、10サイクル経過後も外見上変化が無く、一軸圧縮強度の低下も認められないため、乾湿による劣化は少ないと判断される。

3.3 凍結融解試験

寒冷地における冬季環境下の凍結融解の繰り返し作用による体積変化(膨張・収縮)を把握するために、凍結融解試験を行った。各サイクルでの体積変化と4, 8および12サイクルにおける圧縮強度試験結果を図-5に示す。

体積変化はみられなかったが、圧縮強度はやや増加傾向にあった。これは、セメントの水和反応が試験中においても進行したものと考えられ、凍結融解の繰り返しによる膨張収縮作用による強度低下は少ないと判断される。

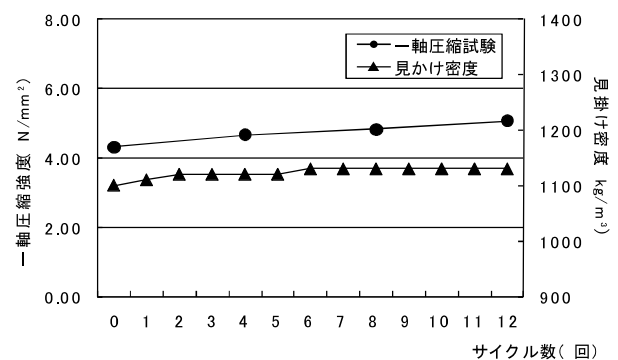
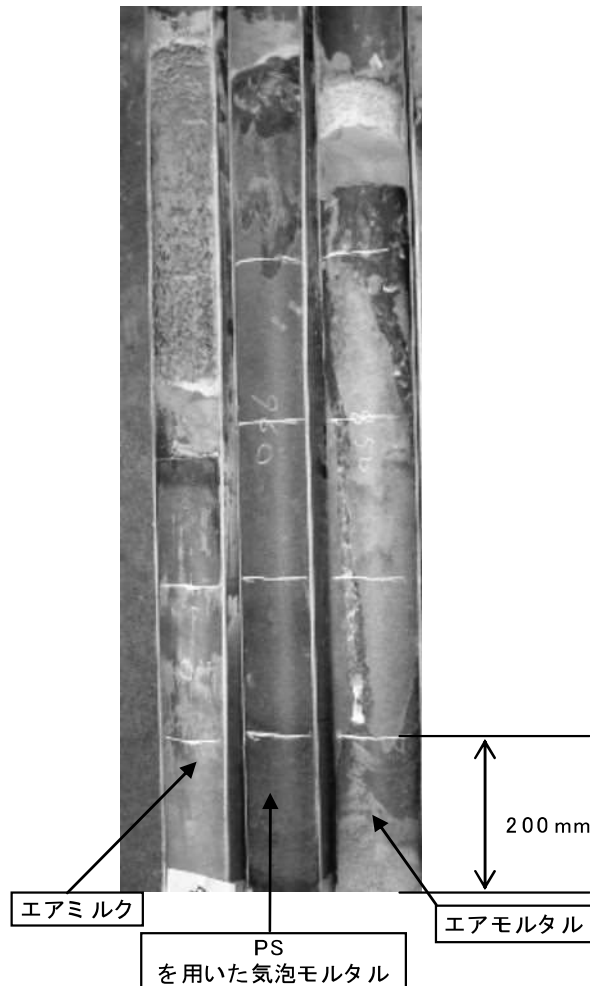


図-5 凍結融解試験結果

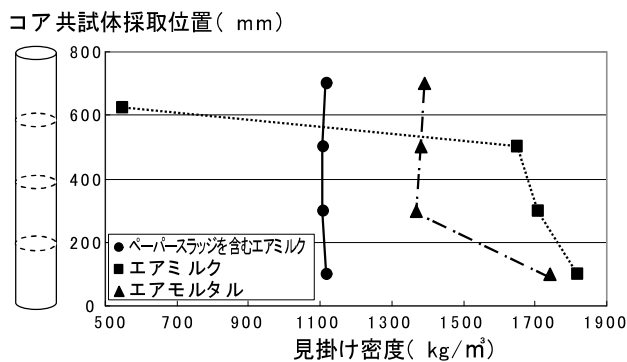
3.4 材料分離抵抗性試験

充填材としての使用を考慮した場合、充填箇所は主に地下水位以下の場所が多く、水が滞留していることが想定される。そのため、滞留水中における施工を想定した材料分離抵抗性試験を行った。

硬化後の状況を図-6に、見掛け密度の結果を図-7、圧縮強度試験の結果を図-8に示す。エアミルクにおいては、水との接触により上部に気泡ブロックが形成されていることが確認できる。また、材料分離も大きく、高さ毎の見掛け密度、一軸圧縮強度は上方ほど小さく、充填物が不均一であることがわかる。エアモルタルは、材料の密度差から砂やセメントが沈殿したため、最下部の見掛け密度および一軸圧縮強度が大

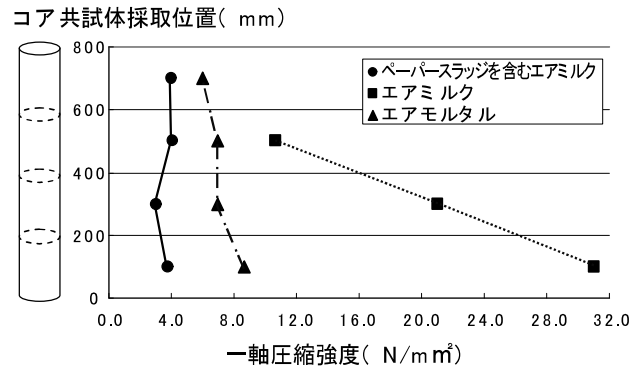


図－6 硬化後の状況



図－7 見掛け密度と充填高さの関係

きくなっており、エアミルクと同様に、充填物は不均一である。これに対して、PSを用いた気泡モルタルは、高さ毎の見掛け密度、一軸圧縮強度のいずれも均一な値が得られた。このことから、一般の気泡モルタル



図－8 一軸圧縮強度試験と充填高さとの関係

ルと比較してPSを混入することにより材料分離抵抗性が著しく高まることがわかった。

4. 実施工例

室内試験の結果が良好であったので2ヶ所の工事現場で実証試験を行った。

4.1 農業用水路の補修・改修工事

農業用水路をはじめとした三面水路のコンクリート構造物は、施工後数十年を経た施設も多く、経済性、施工性および耐久性に優れた補修・改修が必要とされている。その補修・改修工法の一つとして、軽量で高強度かつ自由な長尺成形が可能なFRP板を老朽水路にインサートし、全く新しい管渠に蘇らせる方法がある。ここで、FRP板と既存の水路の隙間を充填する必要がある。この充填材として求められる特性は、小さな隙間でも充填できる流動性、またFRP板に浮力のかからない軽量性、水に触れても分離しにくい安定性、硬化後は乾湿劣化に強いことなどが望まれる。本工事は山形県新庄地区の農業用給排水路の改修工事



図－9 充填箇所



図-10 補修後の状況

ある。充填箇所を図-9, 補修後の状況を図-10に示す。実際に隙間25mm, 底板に水が滞留している条件で施工を行ったが, 滞留水を押し出しながら均一な充填を行うことができた。時間経過と共に経過を確認していく必要性もあるが, 悪条件においても十分な施工性があることが確認された。

4.2 ボックスカルバートの充填閉塞工事

実施工を行った場所は, 神奈川県厚木地区のサイホン撤去工事である。ここではボックスカルバートの撤去困難な箇所にPSを用いた気泡モルタルを使用し充填閉塞を行った。その概要図を図-11, 断面図を図-12に示す。このサイホンは, 昭和24年度から33年度にかけて農業用水の安定供給を図るため建設された延長約18.4kmの幹線用水路の一部である。この用水路は現在も約1,400haの田畑を灌漑する重要な役割を担っており, 今後も安定した農業用水を供給するために, 昭和61年度から農林水産省の補助事業により, 用水路の改修を順次進めている。

充填箇所は1,300mm×1,500mmの大型断面であり, 地下水位より低い場所にあり, カルバート内が常時満水状態となる悪条件の工事現場であった。充填方法は,

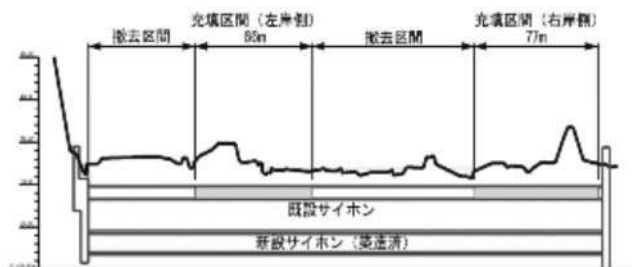


図-11 概要図

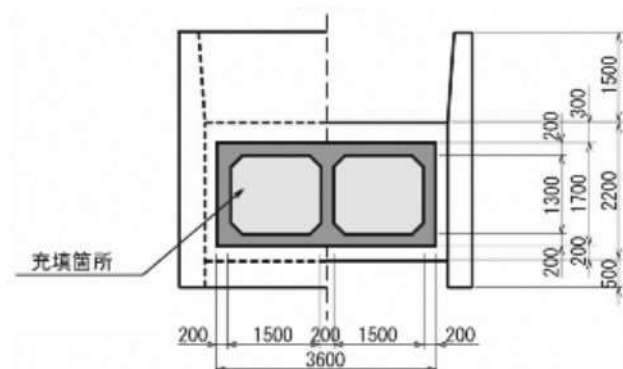


図-12 ボックス断面図

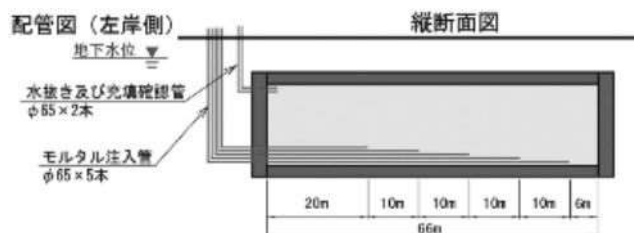


図-13 配管図



図-14 製造プラント

ボックス内に注入管と水抜きおよび充填確認管を設置し, 充填材が充填確認管からブローするまで充填材を圧送する方法で行った。また, 近くに河川があるために水質環境を配慮し, pH管理を行った。配管図を図-13に, ミキシングプラントの外観を図-14に示す。

通常, 主な充填材であるエアミルク, エアモルタルでは滞留水により材料分離してしまうため, 材料ロスを30%程度見込む必要がある, また仮設作業として止水処理を確実にを行う必要もでてくる。設計数量と実施数量を表-4に示す。PSを用いた気泡モルタルで

表－４ 設計数量と実施数量

	単位	右岸側	左岸側	合計
設計数量	m ³	288	257	545
実施数量	m ³	291	258	549
材料ロス率	%	1.04	0.39	0.73

行った結果、仮設作業は配管と端部の処理程度であり、ボックスカルバート内の水を押出ししながら、入れ替わるように充填することができた。pH計測管理の結果より周辺の水質環境に与える影響もなかった、また、水に対する希釈が少なかったために、材料ロスも3%以内に抑えることができた。その結果、実施工においても室内試験で得た結果と同様に材料分離抵抗性の高さを確認することができた。

5. 摘 要

P Sを含んだ気泡モルタルの物性評価および工事現場での施工性の評価について検討を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

- 1) P S気泡モルタルは、ブリーディングおよび凝結硬化時の沈下がなく、体積変化が小さい。
- 2) P S気泡モルタルは、有機質混入により水セメント比が高くなるために、若干の強度低下があるが、曲げ強度は含有繊維の影響から若干増加した。
- 3) P S気泡モルタルは、乾湿繰り返し作用および凍結融解作用に対して高い耐久性を有する。
- 4) P S気泡モルタルは、一般の気泡モルタルに比べ消泡や材料分離に対して高い抵抗性を有する。
- 5) 実施工では、P S気泡モルタルの品質の確保と施工性の向上が確認された。

P Sを用いた気泡モルタルは、充填材としての性能を満足し、さらに気泡モルタルの欠点である消泡や材料分離に対して高い抵抗性を示した。また、実施工においてもその性能を発揮し、施工性の向上がみられた。しかし、P Sの排出量は膨大であり、充填材のみの用途では消化できない。今後、充填材以外の用途においてP Sを用いた気泡モルタルが使用できるように研究、検討していく予定である。

引用文献

- 1) 環境省総合環境政策局環境計画課(2009):環境統計集, 環境省
- 2) 内山智幸, 蓑島裕典, 松島景一郎, 尾谷賢, 鈴木善人, 野田良巳(1999):古紙スラッジのリサイクル, 北海道立工業試験場報告, NO.298, pp.125-132.
- 3) 城戸優一郎, 西本聡, 佐藤厚子(2005):石炭灰, P S灰の土木材料としての検討, 第40回地盤工学研究発表会, 平成17年度発表講演集
- 4) 寺澤良則, 白幡竹彦, 高橋英二, 永富学, 横式龍夫, 山崎亮(2005):リサイクル燃料焚き高温高圧流動床ボイラの実缶運転状況, 三菱重工技報, Vol. 42 No4, pp. 167-171
- 5) 村田二郎, 国府勝郎, 辻幸和(2003):コンクリート工学(I)施工, 株式会社彰国社, pp. 18-94
- 6) セルロース学会(2000):セルロースのこと典, 株式会社朝倉書店, pp. 482-483
- 7) 日本道路公団(1996):気泡混合軽量土を用いた軽量盛土工法の設計・施工指針, pp. 1-58
- 8) 三島信雄, 益村公人(2000):F C B工法—気泡混合軽量土を用いた軽量盛土工法, 理工図書株式会社, pp. 1-194