

# PS 灰と採石粘土を用いたリサイクル地盤材料の活用

浅田 素之 (技術研究所) 小川 恵道 (技術研究所) 堤 博恭 (名古屋支店) 浦野 真次 (技術研究所) 沢田 英一 (技術研究所) 堀内 澄夫 (技術研究所)

## New GeoMaterial Made from Paper Sludge Ash and Clayey Soil

by Motoyuki Asada, Shigemichi Ogawa, Hiroyasu Tutsumi, Shinji Urano, Eiichi Sawada and Sumio Horiuchi

### Abstract

This paper describes the development of a geomaterial made from paper sludge ash mixed with clayey soil. This new geomaterial, which can be used as a back-filling material, is easier to use in the field, costs less than conventional materials, and contains no pollutants. The hybrid soil mixture was developed by a consortium consisting of a by-product supplier, a product manufacturer, a constructor, and a product user. The hybrid soil has three formulations: (1) a hybrid grout with high fluidity and pumpability, (2) a hybrid sand that is a suitable substitute for natural sand as a backfilling material, (3) and a hybrid base that can be used as a base material for road construction. These new materials will help reduce the volume of paper sludge ash that is discarded in landfills.

### 概 要

本論文では、複数の廃棄物を選定・利用して、施工性および製品の品質を格段に高めたリサイクル地盤材料を製造し、環境影響を低減した事例について述べる。廃棄物排出者、製品製造者、製品を用いる施工者、製品利用者がコンソーシアムを組み、利用者の要求に合致した安価な地盤材料提供による事業化を目標とした活動を実施した。製紙業界から排出される廃棄物である PS 灰 (Paper Sludge Ash ; 製紙スラッジ焼却灰) を改良材とし、採石業界から発生する廃棄物である採石粘土に混合し、石灰などの固化材を添加・混合することで、施工性と強度発現を高め、コスト競争力の高い安定処理地盤材料 (ハイブリッドソイル) にできる事実を、室内試験、現場施工試験を通して明らかにした。様々な用途に対応するため、流動性と強度発現に優れ、空洞充填等に適した充填材 (ハイブリッドグラウト)、水道・ガス管等の埋め戻しに適した人工砂 (ハイブリッドサンド)、さらにハイブリッドサンドと粒調採石を混合した路盤材 (ハイブリッドベース) を開発した。

### § 1 . はじめに

静岡県は、印刷用紙の生産量が全国の10%強を占める全国有数の紙生産地である。紙のリサイクル活動が活発になるにしたがい、静岡県に首都圏から大量の古紙が搬入されている (写真 - 1)。その量は、平成11年度で約350万トンに達し、その大部分が、富士市を中心とした富士地域に搬入された。古紙の再生にともなって、県内の産業廃棄物排出量の約3割を占める大量の製紙汚泥 (Paper Sludge; PS) が発生する。PS は、脱水、焼却によって減容化される (写真 - 2)。発生する焼却灰 (PS灰) はセメント原料等としてリサイクルされているものの、埋め立て処分される量も依然として多く、平成11年度の埋め立て処分量は6.4万トンとなっている。すなわち、首都圏で紙のリサイクル活動を進めれば進むほど、富士地域の最終処分場容量が減少する事態となる。写真 - 3にPS灰の最終処分場を示す。

製紙業者にとってPS灰の処理は大きな負担である。また、住民の反対により現状では新たな最終処分場確保が難しく、PS灰リサイクル推進、ゼロエミッション達成は企業経営に直結する重要かつ緊急の課題である。



写真 - 1 富士市内製紙工場に運ばれる大量の古紙



写真 - 2 PS 焼却炉



写真 - 3 PS 灰の最終処分場

一方、山砂等の骨材生産過程から発生する採石粘土(写真 - 4)や建設汚泥は、自然地盤より発生する貴重な資源でありながら、取り扱いが煩雑で利用先が制限されている。採石粘土は全国的に発生しており、最終処分場の確保が非常に困難となっているなど、PS 灰と同様に活用の促進は重要な課題である。



写真 - 4 採石工場の廃棄粘土

処分場の延命化や環境影響、委託処分コストの削減を目的に産業廃棄物の地盤分野への適用が模索されている。静岡県富士工業技術センター<sup>1)</sup>、静岡県紙業協会<sup>2)</sup>が中心となり、PS 灰の地盤材料としてのリサイクルに取り組んでいる。採石粘土については、富士川砂利開発協同組合が中心となり、地盤材料としての有効利用方法を模索している<sup>3)</sup>。しかし、それぞれの検討はそれぞれの業界団体を中心とした検討にとどまっており、複数の廃棄物を組み合わせ、両者の利点を引き出すような検討は現在までほとんど試みられていない。

一方、施工業者にとって、施工品質を一定の水準以上に保つことができ、より安価な材料確保に努力する必要がある。我々は、単独で使用するのに比べて、複数の廃棄物の長所を活かして混合・使用することで、施工性および製品の品質を格段に高められることを見いだした。PS 灰と採石粘土とを所定の配合で混合し、そこに石灰などの固化材を添加・混合することにより、施工性と強度発現性を高め、コスト競争力の高い安定処理地盤材料(以下ハイブリッド(HB)ソイルと称する)が製造できる。上記の知見を基に廃棄物排出者、製品製造者、製品を利用する施工者、製品利用者がコンソーシアムを組み、利用者の要求に合った安価な地盤材料提供による事業化を目標とした活動を実施した。

HB ソイルの施工性は、PS 灰、採石粘土単体で用いるよりも格段に向上している。一方、競合商品で現状用いられている流動化処理土、山砂、粒調採石と物性が大きく異なり、しかも製紙会社ごとに灰の粒度、物性が異なるため、施工管理方法が複雑である。灰の受入れ態勢と用途を考慮した配合設計を行う必要がある。

本論文では、原料である廃棄物と開発材料であるHBソイルの特徴、研究所で主に検討した事業採算性の試算、流動化地盤材料としての配合・施工試験、地盤材料としてHBソイルを活用した現場施工試験について述べる。

## § 2. HBソイル

### 2.1 HBソイルの概要

製紙汚泥焼却灰であるPS 灰は、 $0.35 \sim 0.82\text{g}/\text{cm}^3$ と単位容積質量が小さく、軽量地盤材料としての利用が検討されてきた。PS 灰の粒子表面形状は、複雑な凸凹や空隙が多数見られ、非常に大きなかみ合いによる拘束力が粒子間に作用し、大きな間隙比の下で安定な構造を有する(写真 - 5)。そのため、単位容積質量が小さくなっている。しかし、複雑な粒子表面形状、粒度分布のかたよりにより、PS 灰単体では水を加えても粒子同士の摩擦が大きく、流動性は持たない。また、その複雑な粒子表面形状により締固めが困難なため、利用用途が限られていた。

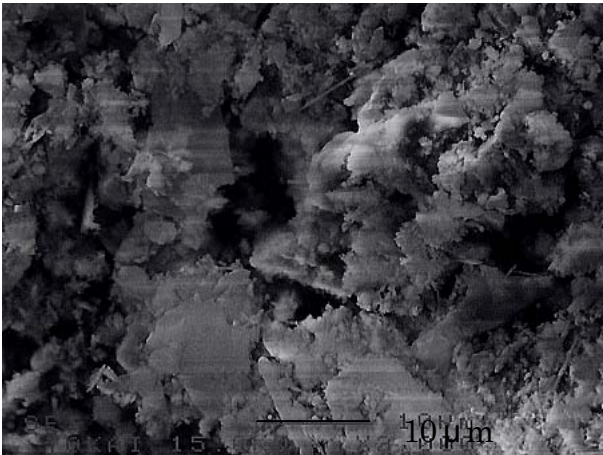


写真 - 5 PS 灰の電子顕微鏡写真

そこで、骨材の製造工程から発生する細粒分である採石粘土を混合し、PS 灰の粒度を調整、あるいは流動化処理して利用するHBソイルを考案した。

配合により、流動性と強度発現に優れ、空洞充填等に適した充填材 (HB グラウト) や水道・ガス管等の埋め戻しに適した人工砂 (HB サンド)、さらにクラッシャーランを混合した路盤材 (HB ベース) と、様々な用途に対応した商品の開発を進めた(図 - 1)。

HB グラウトは、採石粘土にPS 灰を20～50wt%添加し、含水比を70～100%、水セメント比を300～650%に調整、流動化した充填材料である。場合により発泡剤を添加し、発泡グラウトとすることもできる。

HB サンドは、採石粘土に改良補助材としてPS 灰を20～40wt%、固化材として高炉セメントと生石灰を数wt%混

合した軽量な人工砂で、路床材～下層路盤材、裏込め材、埋戻し材はもちろん、耕作土や法面吹き付け材などとして利用できる。軽量で粘着力c、せん断抵抗角φを有する高強度で安定な地盤にできる。

HB ベースは、在来のクラッシャーランにHB サンドを20～40wt%混合した路盤材である。骨材の空隙をHB サンドが充填することで強度が大幅に向上する。

以下に、PS 灰と採石粘土との混合処理の有効性を示すために行った室内配合試験結果を述べる。

## 2.2 廃棄物の物性と法的取り扱い

表 - 1 に、9 カ所の焼却施設から発生するPS 灰と採石粘土の物理・化学的性質を、写真 - 6 に外観を示す。

PS 灰を構成する主成分は、二酸化珪素 ( $\text{SiO}_2$ )、酸化アルミニウム ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )、酸化カルシウム ( $\text{CaO}$ )、酸化マグネシウム ( $\text{MgO}$ ) などであり、一般の土砂に近い化学成分で構成されている。利用する古紙の種類や焼却炉形式の違いにもよるが、土砂や石炭灰に比して、PS 灰は $\text{SiO}_2$ が少なく、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$  が多く含んでいる。すなわち、PS 灰にはポゾラン反応を活性化させる物質 (石灰、アルミナ、酸化鉄など) の含有比率が良好で、土質改良効果が高い。強熱減量については、0.3～22%とばらつきが見られ、PS 灰の利用目的や焼却条件によって未燃分に多少が見られる。土粒子密度は $2.29\sim 2.73\text{g}/\text{cm}^3$ 、単位体積質量は $0.35\sim 0.82\text{g}/\text{cm}^3$ である。焼却施設が異なると灰の色や性状も大きく異なる。灰の性状が製品の品質 (流動性、強度) に与える影響を、室内配合試験により検討した。

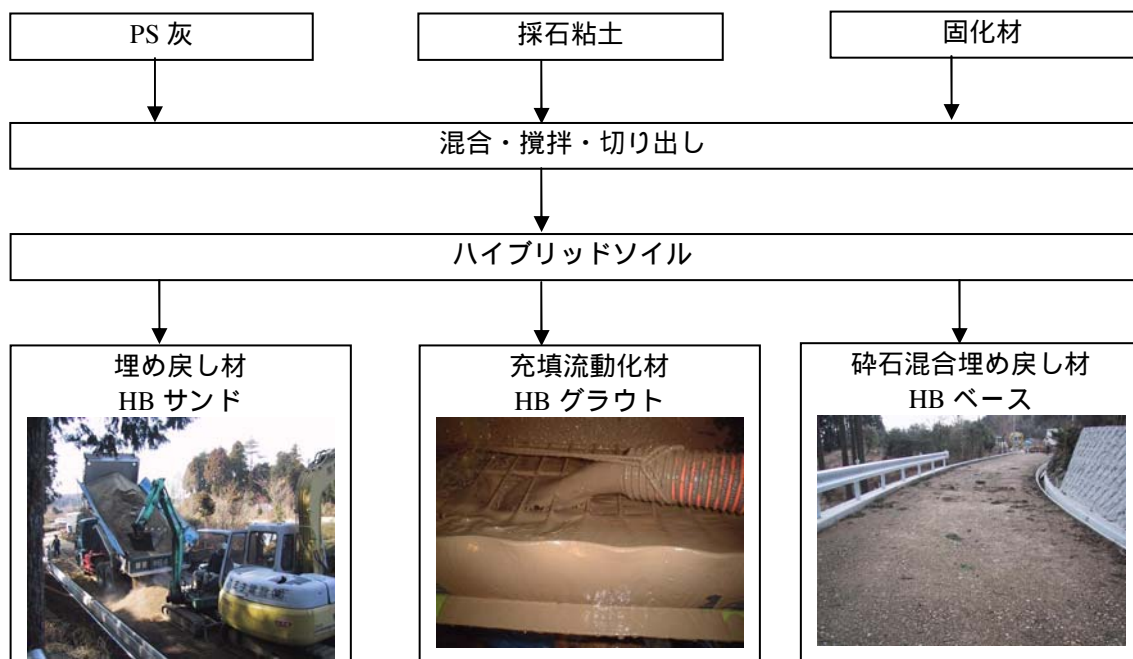


図 - 1 HB ソイルの概要

表-1 PS灰と採石粘土の物性

| 灰種 | 粒度分布(%) |    |     |    | 組成(%) |                                |                                |      |     |                  |
|----|---------|----|-----|----|-------|--------------------------------|--------------------------------|------|-----|------------------|
|    | 粗砂      | 細砂 | シルト | 粘土 | 強熱減量  | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO  | MgO | SiO <sub>2</sub> |
| A  | 20      | 34 | 37  | 9  | 0.9   | 33.9                           | 0.7                            | 7.7  | 3.7 | 53.2             |
| B  | 6       | 21 | 70  | 3  | 1.7   | 24.6                           | 0.6                            | 26.6 | 4.7 | 41.9             |
| C  | 37      | 32 | 21  | 10 | 0.6   | 28.2                           | 1                              | 26.1 | 3.9 | 40.3             |
| D  | 37      | 8  | 24  | 31 | 8.4   | 25.8                           | 0.7                            | 7.9  | 5.9 | 51.3             |
| E  | 19      | 9  | 67  | 5  | 22    | 26.1                           | 0.7                            | 18.7 | 3   | 29.6             |
| F  | 8       | 2  | 55  | 35 | 1.7   | 33.6                           | 1.1                            | 15.2 | 3.4 | 45.1             |
| G  | 0       | 5  | 54  | 41 | 4.5   | 46.6                           | 2.2                            | 2.4  | 5.2 | 39.1             |
| H  | 13      | 32 | 38  | 17 | 0.3   | 33.2                           | 4.4                            | 9.5  | 3   | 49.5             |
| I  | 17      | 4  | 10  | 69 | 3.1   | 30                             | 3.5                            | 9    | 2.9 | 51.4             |
| 粘土 | 0       | 0  | 7   | 93 | 5     | 9.1                            | 6.9                            | 0.6  | 1.3 | 77.2             |

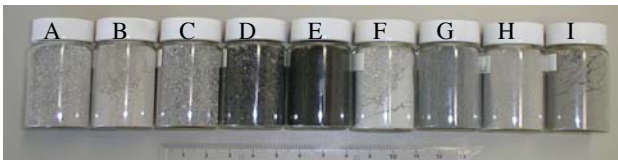


写真 - 6 PS灰の外観

採石粘土は陸掘り砂利を洗浄した粘性土の残留物であり、凝集剤が残留しているものの、普通の土砂と同様に無害な廃棄物である。中には微少な粒径の粘土鉱物を多く含み、石灰系固化材との反応が活発で、ポゾラン反応、イオン交換反応などが起こる。

PS灰は燃えながら、または煤塵、採石粘土は汚泥に分類される産業廃棄物であり、法規制に則った適正な処理や利用が前提になる。PS灰と採石粘土を有価で利用する場合以外は、廃棄物の処理および清掃に関する法律に則った適正処理が義務付けられる。一方、廃棄物でも資源価値が大きく無害性の高いものは利用を促進すべき資源として、資源有効利用促進法（以下、リサイクル法）で指定され、有効利用の促進を図ることで、環境保全、資源節約、処分場の延命化などを行っている。

廃棄物を原料として再生利用する時、事業者の責務として環境基本法では、「環境への負荷低減に資するように努めなければならない」と定められている。すなわち、製品段階で「土壤汚染に係る環境基準（平成3年8月23日、環境庁告示第46号）」、「ダイオキシン類対策特別措置法に定める環境項目（平成14年7月22日、環境省告示第46号）」を満たすことが前提となる。PS灰単体では土壤環境基準をおおむね満足するが、フッ素のみ環境基準を超過する。そのため、HBソイルの課題として、製造段階でのフッ素の溶出低減方法がポイントとなる。

### 2.3 HBソイルの事業採算性検討

事業化を達成するには、採算を確保することが大前提

である。事業採算性を検証するために、HBソイルの富士地域での需要量予測を行った。分析に利用可能なデータは限られており、ここでは、静岡県の日別道路用砕石出荷量（1989年1月～2002年9月）を用いてハイブリッドベースの需要量予測を行った。

予測には季節性を考慮した非定常時系列モデルである、SARIMAモデルを採用した。

一般に、多くの時系列分析は、定常時系列を前提としている。今回取り扱う非定常時系列データの場合、定常時系列に近似するため、対数変換した後、階差および季節階差を取り、トレンドおよび季節性を除去する。

時系列  $\dots, x(t-p), x(t-p+1), \dots, x(t-2), x(t-1), x(t)$  に対して、 $x(t) = x(t) - x(t-1)$ を1次の階差という。また、 $x(t) - x(t-12)$ を季節階差という。

次に、自己相関および偏自己相関分析を行い、時系列分析における次数を決定した。次に予測値から算出された誤差の自己相関、偏自己相関分析、およびBox-Ljung検定によりモデルの妥当性を検討し、需要量予測と、出荷目標との整合性を確認した。

### 2.4 現場実証試験

HBソイルのうち、空隙充填材のHBグラウトおよび埋戻し材のHBサンドに関する有効性を現場で確認するため、ポンプ圧送試験、シールド導管充填試験工事を実施した。

#### 2.4.1 ポンプ圧送試験

HBグラウトはポンプ圧送して空隙に充填するだけで所定の性能（強度、分離抵抗性、自己充填性）を発揮する材料のため、狭隘な箇所の施工性に優れている。

HBグラウトの施工は、原料であるPS灰と採石粘土の解泥、固化材の添加・攪拌、ポンプ圧送の順に行う。この手順のうち、ポンプ圧送の際には、配管内部の圧力損失を最小化し、配管内のつまりや圧力上昇を抑える必要がある。しかし、HBソイルは摩擦係数の大きいPS灰を含む新材料のため、圧送可能性を試験により明らかにする必

表 - 2 圧送試験の配合

| 材 料         | 種 類             | 仕 様                                     |     |      |     |        |
|-------------|-----------------|---|-----|------|-----|--------|
| セメント        | 高炉セメント B 種 (BB) | 太平洋セメント (株) 社製 密度 3.04g/cm <sup>3</sup> |     |      |     |        |
| 混和材         | PS 灰            | 富士製紙協同組合製 密度 2.15g/c m <sup>3</sup>     |     |      |     |        |
|             | 粘土              | 三興開発社製 密度 2.63g/c m <sup>3</sup>        |     |      |     |        |
| 練混ぜ水        | 河川水             |   |     |      |     |        |
| 実験ケース名      | 配合名             | 単体量 (kg/m <sup>3</sup> )                |     |      |     |        |
|             |                 | セメン                                     | 粘土  | PS 灰 | 水   | 高性能減水剤 |
| 4in-BB-PS   | BB-PS           | 150                                     | 350 | 300  | 675 | -      |
| 3 in -BB-PS | BB-PS           | 150                                     | 350 | 300  | 675 | -      |
| 3 in -BB    | BB              | 250                                     | 465 | -    | 673 | -      |

要がある。そのため、HBグラウト配合と流動特性の関係について、現場圧送試験を行い、圧送可能性を把握した。圧送目標距離は1200mとした。表 - 2 に使用した材料と配合を示す。

使用した試験装置は以下のとおりである。

コンクリートポンプ：(株)シンテック社製MKW-35VHII

最大吐出圧力6.13MPa、最大吐出量35m<sup>3</sup>/h

圧送配管：3インチ(S1)管・4インチ(S0)管、L=400.74m  
配管内に6カ所圧力計測装置を設け、圧力損失を把握した。

#### 2.4.2 シールド導管充填試験工事

静岡県内のシールドトンネル埋め戻し工に、HBグラウト、縦坑にHBサンドを使用した。シールドトンネルのセグメント外径 2420mm、断面積4.6m<sup>2</sup>、充填断面積4.14m<sup>2</sup>、延長L=1.0km である。発進縦坑の断面積45.0m<sup>2</sup>、深さ20.0m、到達縦坑の断面積24.0m<sup>2</sup>、深さ21.0m である。

図 - 2 に示すとおり、シールドトンネル内に発泡剤を混合した発泡HB グラウト(目標強度 $q_{u28} = 0.5N/mm^2$ 、目標フロー値 $230 \pm 20mm$ 、目標比重 $0.77 \pm 0.05$ )を、縦坑埋め戻し底部には、目標強度 $q_{u28} = 1.0N/mm^2$ 、目標フロー値160mm 程度、目標比重 $1.55 \pm 0.05$  の高強度HB グラウトを充填し、縦坑の上面はHB サンドで埋め戻した。

グラウトの強度特性は水セメント比と含水比に大きく左右される。当初計画の配合は1.0km 以上が打設可能な

配合を主眼としていたうえ、試験練りの強度特性も目標値より発現しすぎた。このため、圧送距離に応じた配合を再検討して表 - 3 のとおりとした。ただし、HBサンドは当初計画通りの配合とした。

発泡HB グラウトに係わるシールド導管充填工の施工手順を、図 - 3 に示す。HB ソイル製造プラント(写真 - 7)でPS 湿灰、採石粘土、生石灰を所定の配合で混練し、ダンプで流動化プラントまで運搬した後、水、セメント発泡剤を添加し発泡HB グラウトを製造するシステムとした。

表 - 3 HBソイルの配合

| 種類         | 配合 (kg/m <sup>3</sup> ) |          |          |     |          | 発泡率 (%)   |
|------------|-------------------------|----------|----------|-----|----------|-----------|
|            | 採石粘土                    | PS 灰     | BB セメント  | 生石灰 | 水        |           |
| 発泡HB グラウト  | 150                     | 140      | 140      |     | 395      | 41.7      |
|            | ~<br>160                | ~<br>160 | ~<br>150 |     | ~<br>420 | ~<br>43.8 |
| 高強度HB グラウト | 365                     | 365      | 220      |     | 650      |           |
| HB サンド     | 1070                    | 270      | 33       | 40  | 420      |           |

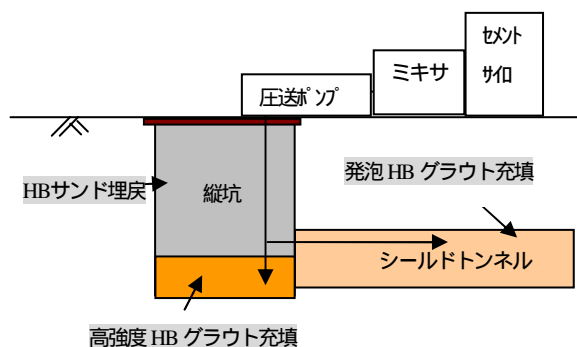


図 - 2 シールド充填工事の概要

発進縦坑脇ヤードに流動化プラントを構築した。縦坑底部のトンネル坑口から圧送管(2インチ)とエア抜き管を配管するとともに、グラウト材の流出を防止するための仕切り壁(HB グラウトを詰める布製パック; 写真 - 8 参照)を50~100m間隔で構築した。

HB グラウトを地上に設置したピストンポンプで所定場所まで圧送して充填した。2 層に分けて充填してガス導管の浮き上りを防止した。

トンネル内の充填が完了した後、縦坑の埋め戻しを開始した。埋め戻し土(HB サンド)自重によるガス管の沈下を防止するため、底部よりガス導管下端までは、高強

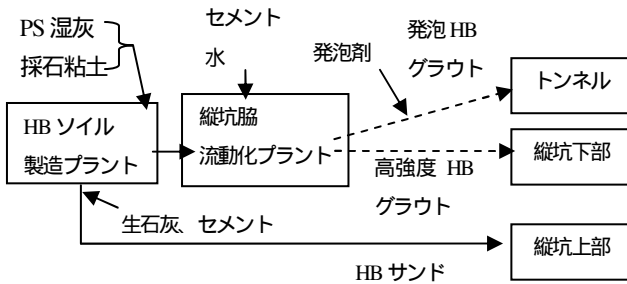


図 - 3 充填工事の施工概要（実線はダンプ輸送、点線はポンプ圧送）



写真 - 7 HB ソイル製造プラント



写真 - 8 トンネル仕切用モルタルパック

度HB グラウトを打設した。この圧送距離は50m以下と短いことから配合を見直し、充填用発泡HB グラウトに準じて施工および管理した。

高強度HB グラウトより上部はHB サンドで埋め戻した。HB サンドはプラントで製造し製品を現地までダンプ運搬して供給した。

所定高さまで埋め戻した後、地上部の現場密度試験、

現場 CBR 試験、スウェーデン式貫入試験を実施して、沈下量などの品質項目を確認測定した。

### § 3. 検討結果

#### 3.1 室内配合試験

図 - 4 に粘土と灰 B を質量で等量混合した混合土の粒度分布を示す。PS 灰単体での均等係数は  $U_c=3.1$  だが、粘土を加えることで  $U_c=8.3$  まで改善できる。

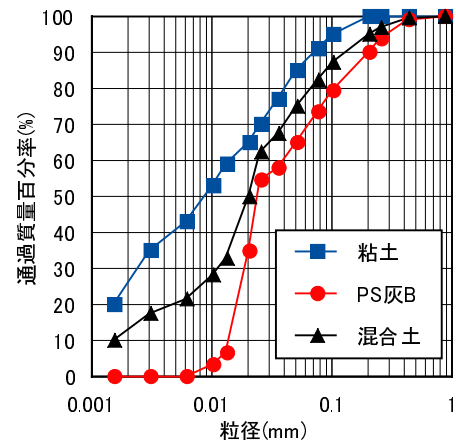


図 - 4 PS 灰と粘土の混合による粒度分布変化

流動化処理した灰 B の含水比を 136% に固定し、粘土/PS 灰の混合比を変化させて、混合スラリーの粘度を B 型粘度計で測定した。結果を図 - 5 に示す。粘土添加量を大きくしていくと粘性が急激に低下する。

次に、含水比を 122% に固定した混合スラリーの、A~I の灰種による流動性の違いをフロー試験 (JIS A 313) で調べた。粘土/PS 灰混合比は 0.875 に調整した。フロー値が高いほど流動性が高い。図 - 6 に結果を示す。細砂分含有率とフロー値の相関が高く、混合土の粒度分布がスラリーの流動性に与える影響が大きい。粘土、シルト分の粒度分布が良い灰 A、H が最も流動性が高い。灰 C、D、E は粗粒分が多いため若干流動性が悪い。粘土分が多い灰 F、G、I は、多量に加えるとかえって流動性が悪くなる。

A~I の灰種による強度発現性の違いを一軸圧縮試験 (JIS A 1216) で調べた。配合は上記と同様である。

灰の物性のうち、強度発現性に最も大きな影響を与えるのは強熱減量である。図 - 7 に強熱減量と 28 日強度との関係を示す。セメント添加量は  $75\text{kg}/\text{m}^3$  とした。強熱減量が 4% を超えると強度が急激に下がる。強熱減量 8% の灰 D は粗粒分含有量が大きく、強度が極端に大きく発現されるため、図 - 7 から除外している。

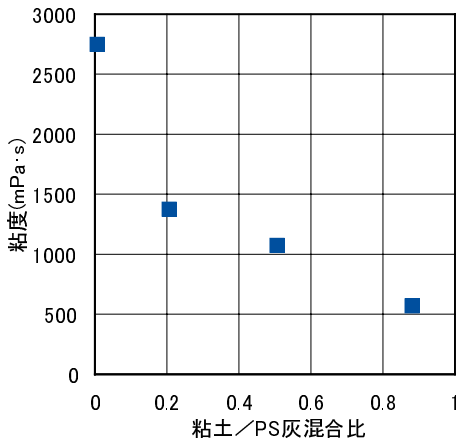


図 - 5 PS 灰+粘土スラリーの混合比による粘性変化

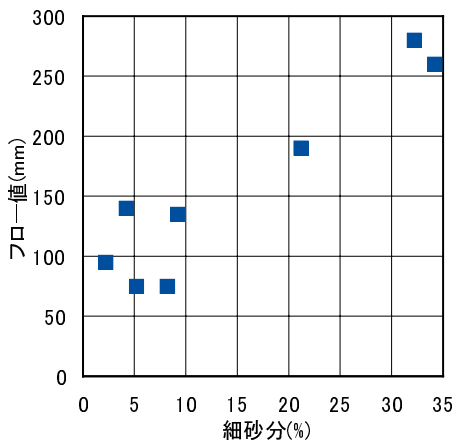


図 - 6 PS 灰+粘土スラリーのフロー値と細砂分含有量の関係

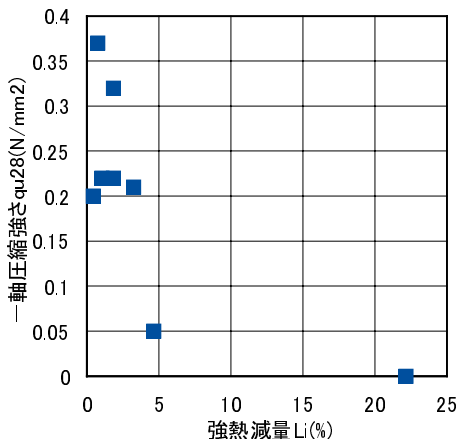


図 - 7 PS 灰+粘土スラリーの強熱減量と 28 日一日圧縮強さとの関係

### 3.2 フッ素の溶出低減方法検討

PS 灰に含まれるフッ素低減対策として、加湿、セメントによる固化の効果を試験した。PS 乾灰に30%の水を添加した試料と、高炉B種セメント10%、水30%を添加した試

料についてフッ素溶出量の経時変化を調べた。試験結果を図 - 8 に示す。

乾燥PS 灰に最適含水比以上 (w 30%) 加水した直後のフッ素濃度低減率は0.5 であった。3 日以上養生したものはさらに低減率が0.2 になる。PS 灰に含まれるフッ素と石灰成分が反応してホタル石 (フッ化カルシウム  $\text{CaF}_2$ ) として固定化されると考えられた。

加湿・養生したPS 灰に高炉セメントを10%添加した試料は、セメントを加えない場合に比べて溶出量を半減させることができる。さらに、養生することで溶出量は低下する傾向が見られた。

以上の結果より、製品出荷段階にフッ素の環境基準 0.8mg/L を満たすためには、乾燥したPS 灰で8.0mg/L、加湿灰で1.6mg/L以内のものを適用可能とした。加湿したPS 灰にセメントを加えて養生することにより、溶出量をさらに50%以上低下させることが可能になる。

この方式に則った原料および製品の確認実験を3 週間にわたり実施した(n=16)。加湿PS灰のフッ素濃度平均 $\bar{x}$ は0.96mg/L で、標準偏差は0.22 であった。これより、95%信頼限界では、フッ素溶出値の範囲は $\bar{x} \pm 2 \cdot \sigma = 0.96 \pm 2 \times 0.22 = 0.74 \sim 1.44 \text{mg/L}$  となり、上記の自主基準内のばらつきに収めることが可能になる。

表 - 4 に示すとおり、上記の加湿・養生対策を施したPS 灰を用いて製造した製品の溶出試験結果は最も厳しい土壌環境基準を十分満たしている。

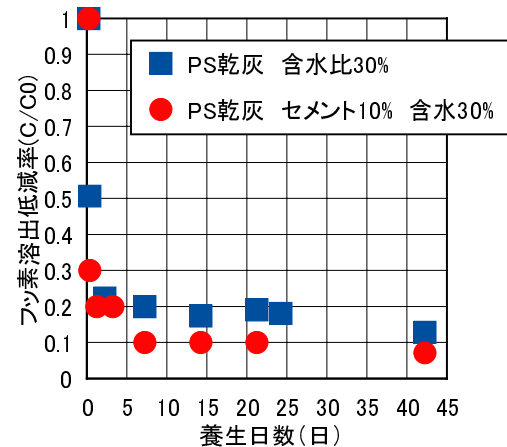


図 - 8 フッ素溶出量の加水、セメント添加、養生による低減効果

表 - 4 原料と製品のフッ素溶出量およびダイオキシン類含有量

|                        | 採石粘土  | PS 湿灰  | HB グラウト | HB サンド |
|------------------------|-------|--------|---------|--------|
| フッ素 (mg/L)             | 0.35  | 0.72   | 0.63    | 0.25   |
| ダイオキシン類 (pg-TEQ/g-dry) | 0.098 | 0.0016 | 0.17    | 0.23   |

### 3.3 事業採算性検討

静岡県の月別砕石出荷量の時系列データより、HBソールのうち、HBベースの将来予測出荷量を検討した。

SARIMAモデルにおけるpおよびqの次数を決定するため、モデルのAIC(Akaike Information Criterion)、SBC(Schwartz Bayesian Criterion)および対数尤度を比較し、最適なモデルを選択した結果、p=1、q=1のモデル(SARIMA(1, 1, 1)、(0, 1, 0)<sub>12</sub>)を採択した。

予測式を次式に示す。

$$X(t) = \{ \ln x(t) - \ln x(t-1) \} - \{ \ln x(t-12) - \ln x(t-13) \}$$

$$X(t) - 0.00009 = 0.428 \times \{ X(t-1) - 0.00009 \} + u(t) - u(t-1) \quad (1)$$

図-9に、予測値と実績値とを比較した時系列グラフを示す。実績値と予測値との相関係数は0.936であり、(1)式で表される本モデルの精度は十分高い。

図-10に、静岡県における2003年以降の月別砕石出荷量の予測値を示す。今後5年間の年間砕石出荷量は減少傾向にある。

次に、道路用砕石出荷量と密接な関係があると考えられる舗装道路実延長を用いて、静岡県の砕石予測出荷量から富士市の砕石予測出荷量に変換することを試みた。すなわち、富士市の砕石出荷量の静岡県に占める割合は、同市の舗装道路実延長の静岡県に占める割合に等しいと仮定し、予測を行った。

図-11に、富士市および静岡県の舗装道路実延長、および富士市の舗装道路実延長の静岡県に対する割合の経時変化を示す。同図より、富士市の舗装道路実延長の静岡県に対する割合は、0.04でほぼ一定であることがわかる。

このことから、富士市の砕石出荷量は静岡県の0.04倍と想定し、図-10に示す静岡県の年間砕石出荷量(予測値)を0.04倍し、富士市のそれを求めると表-5のようになり、この値が富士市の道路用砕石出荷量の予測値となる。

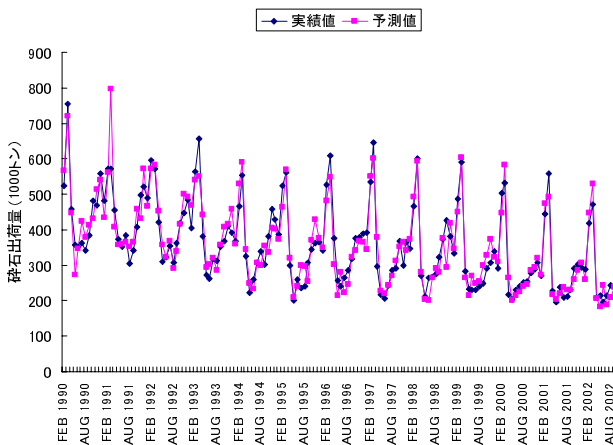


図-9 静岡県砕石出荷量の予測値・実績値

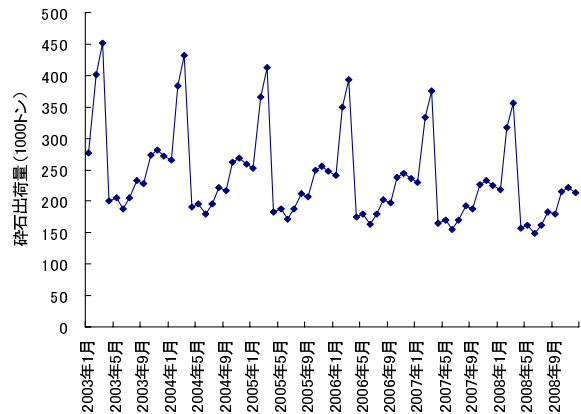


図-10 静岡県砕石出荷予測値

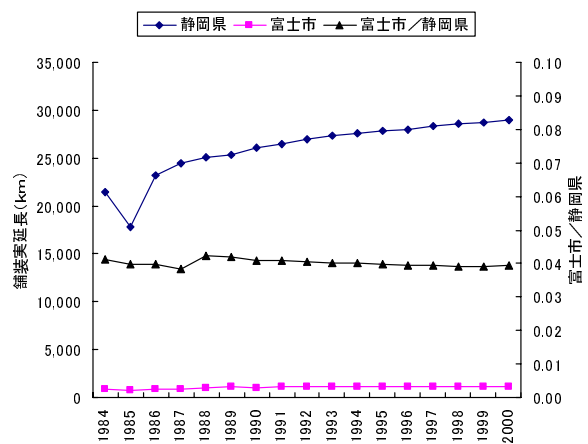


図-11 富士市・静岡県の舗装道路実延長・割合

表-5 富士市の砕石出荷予測値

| 予測年  | 予測量(t)  | 予測年  | 予測量(t)  |
|------|---------|------|---------|
| 2003 | 129,000 | 2006 | 112,000 |
| 2004 | 123,000 | 2007 | 107,000 |
| 2005 | 117,000 | 2008 | 101,000 |

初期に設定しているハイブリッドサンド、ハイブリッドベースの需要量目標は15000m<sup>3</sup>、10000トンであり、今後5年間の富士市の砕石需要予測量の10%にあたるため、設定目標量は妥当であり、本事業の採算性は高いと判断できる。

### 3.4 試験工事

#### 3.4.1 ポンプ圧送試験

図-12~14に、各配合の圧送時圧力の最大値と圧送距離の関係性を把握した。PS灰を混合したHBグラウトの圧送圧力はPS灰の抵抗により大きくなっている。PS灰無配合のHBグラウトに比して、高速圧送時は40%程度、低速時には80%程度上昇した。

3インチ管の平均の管内圧力損失は4インチ管に比し



て多少上昇する程度で、大きな差は認められない。どちらも400m 圧送して、圧力損失は1MPa 程度である。PS 灰配合のHB グラウトを、3 インチ管でL=1200m 圧送した場合、圧力損失は約4MPa と予想され、コンクリートポンプの圧送可能圧力(最大吐出圧力(6.13MPa)×0.8=4.9MPa)の範囲内にとどまった。

以下に、圧送距離：1200m、圧送速度 18.5m<sup>3</sup>/h、打設勾配：0.2%上りのケースの圧送圧力を試算する。

$$0.0029 \times 1200 + 0.2\% \text{ 上方自重分圧力 } (0.034\text{MPa}) = 3.514\text{MPa} \quad 6.13 \times 0.8 = 4.9 \text{ MPa}$$

上記の計算のように、このコンクリートポンプを用いれば、0.2%の上り勾配で、1200mの圧送が可能である。

配管材については、S1 タイプ継手の使用時最大圧力3MPa であり、1200m圧送時に圧送圧力が最大圧力を超過するため、ポンプから一定距離は高強度のM1 タイプの配管材に変更する必要がある。また、長距離を圧送する場合には、ポンプの脈動により配管が暴れる恐れがあり、ジョイント部分が破損しやすく、疲労破壊する可能性がある。このため、配管は強固に固定する必要がある。

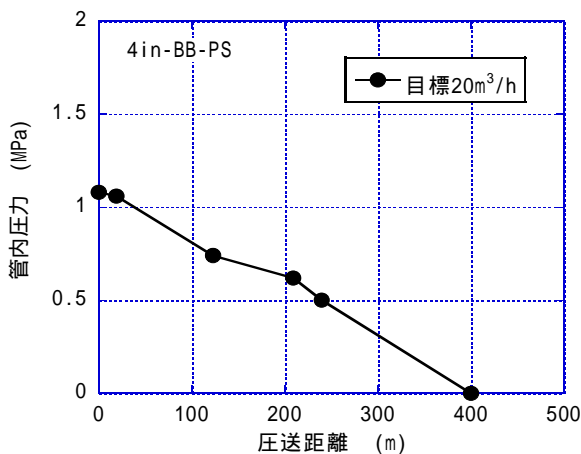


図 - 1 2 4in-BB-PSの管内圧力測定結果

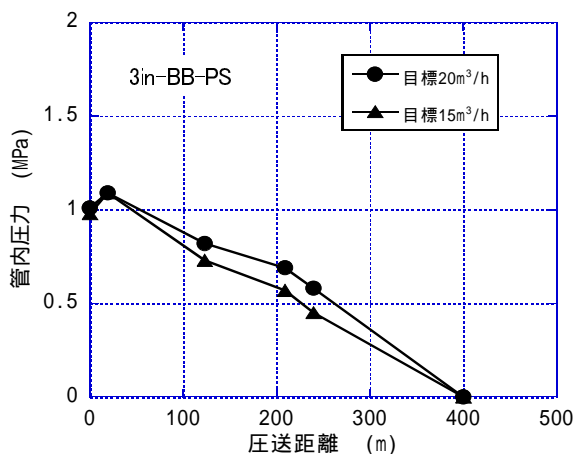


図 - 1 3 3in-BB-PSの管内圧力測定結果

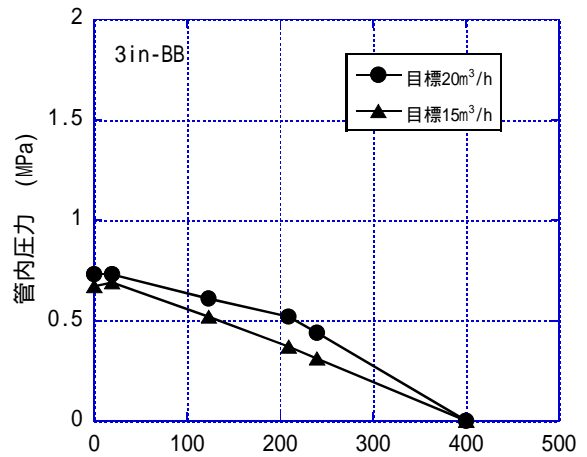


図 - 1 4 3in-BBの管内圧力測定結果

### 3.4.2 シールド充填施工試験

本試験工事のシールドトンネル内充填工では、無発泡HBグラウト製造者とグラウト圧送業者が異なっており、圧送業者が無発泡HBグラウトに発泡剤を混合して発泡グラウトとした後、圧送する手順であった。

このため、配合試験で発泡前後の品質管理目標を明確にするとともに、発泡前の製品の品質を重点的に管理した。

品質管理の頻度は1回/日または250m<sup>3</sup>ごとに、一軸圧縮強度(7、28日)、ブリージング率、フロー値、生比重について品質管理を実施した。その結果を表-6に示す。qu28は発泡グラウト0.5N/mm<sup>2</sup>以下、高強度グラウト1.0N/mm<sup>2</sup>以上の目標を満足している。また、2インチ管で問題なくポンプ圧送することができるフロー値212mmを確保できた。PS灰単体では実現不可能な2インチ管1kmの圧送を実現できた。

表 - 6 充填試験結果

| 管理項目                 | 単位                | 発泡 HB グラウト |      | 高強度 HB グラウト |      |
|----------------------|-------------------|------------|------|-------------|------|
|                      |                   | 7 日        | 28 日 | 7 日         | 28 日 |
| 一軸圧縮強度 qu            | N/mm <sup>2</sup> | 0.27       | 0.37 | 1.67        | 4.13 |
| フロー値                 | mm                | 212        |      | 226         |      |
| ブリージング率              | %                 | 0          |      | 0.8         |      |
| 生比重                  |                   | 0.773      |      |             |      |
| 空気量                  | %                 | 44.5       |      |             |      |
| 含水比                  | %                 | 59.7       | 32.4 | 66.0        | 61.0 |
| 変形係数 E <sub>50</sub> | MN/m <sup>2</sup> | 82         | 99   | 371         | 813  |

工事着手前・後の地下水の水質を確認した。すなわち、施工に先立ち工事区間の上流側および下流側から基準地下水を採取し、「地下水の水質汚濁に係わる基準」および「ダイオキシン類特別措置法の水質に係わる項目」について検査した。次いで、竣工後、同一井戸から再度地下水を採取して施工前の溶出量との変化を確認して環境

基準以下であることを確認した。

さらに、施工時の異常を早期に発見する目的で、1回/月頻度でpH、塩化物イオン、電気伝導率データも併せて収集して、変化の小さいことも確認した。すべての項目で環境基準を満足しているうえ、施工前・後の溶出量の変化もみられない。以上より、HB ソイルによる地下水への影響はなく、環境安全性は十分に確保されている。

#### § 4. おわりに

産業廃棄物であるPS灰と採石粘土を混合したハイブリッドソイルは、土壌環境基準を満足する清浄な材料である。PS灰、採石粘土、それぞれ単体では用途の限られる材料も、混合することで、粒度調整ができ、施工性が高く、コスト競争力のある地盤材料、HBソイルにできた。

流動化・充填材料であるHBグラウトのポンプ圧送可能性を試験で確認した後、シールド導管工事に利用し、PS灰単体では実現不可能な1km以上のポンプ圧送を可能にした。試験結果より、新材料であるHBソイルは現場で利

用できることを実証できた。

また、新材料の需要量予測を行い、目標が十分達成可能であることも確認できた。

現在、製造プラントを三興開発(株)が建設し、今年度中にも本格的な稼働を始める予定である。今後は土木研究センターの材料認定を取得し、施工実績を積み重ねる。また、PS灰の改良効果、フッ素の固定化効果を改善するため、紙面塗工材の廃棄物である廃石灰を利用して、さらなる廃棄物のリサイクルに貢献する所存である。

#### 謝辞

本研究は経済産業省関東経済産業局平成14～15年度地域新生コンソーシアム研究開発事業として、(社)静岡県環境資源協会、静岡ガス(株)、富士製紙協同組合、東海大学福江研究室、三興開発(株)と共同して進めた。ここに記して関係者に謝意を表します。

#### <参考文献>

- 1)PS灰の土質材料開発研究検討委員会：“土質材料としてのPS灰有効利用ガイドライン案”，1994
- 2)(社)静岡県紙業協会，(社)日本建設機械化協会，建設機械化研究所：“PS焼却灰有効利用実証試験総括報告書”，2000
- 3)富士川砂利開発協同組合：“平成12年度社会要請対応円滑化支援事業(組合等助成事業)報告書”，2001
- 4)浅田素之，堤博恭，堀内澄夫，福江正治：“PS灰の流動化処理によるリサイクル事例”，土と基礎Vol.51 No.6，pp13～15，2003