

# 港湾技研資料

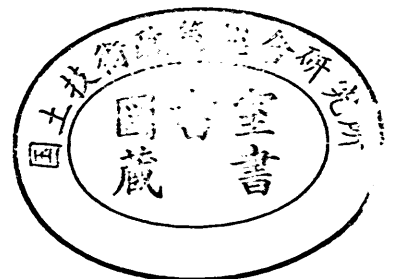
TECHNICAL NOTE OF  
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE  
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 886 Dec. 1997

石炭灰および鉄鋼スラグの活用技術

高橋 邦夫

運輸省港湾技術研究所



## 目 次

要旨	3
1. まえがき	4
2. 石炭灰の活用技術	4
2.1 石炭灰の概要とその活用技術開発研究の経緯	4
2.2 石炭灰の成分および材料特性	6
2.3 羽田沖展における流動床灰による軟泥土固化処理の現地実験	7
2.4 羽田沖展における石炭灰路盤の現地実験	7
2.5 荊田沖合人工島における表層処理現地実験	8
2.6 中部電力碧南火力発電所における土圧実証実験	9
(1) 中部電力碧南火力発電所における土圧実証実験	9
(2) 遠心力載荷実験	11
2.7 FGC深層混合処理工法の実験	12
2.8 石炭灰固化物のSCP材としての検討	15
2.9 まとめと今後の課題	16
3. 鉄鋼スラグの活用技術	17
3.1 鉄鋼スラグの概要	17
3.2 鉄鋼スラグの成分および材料特性	19
3.3 水砕スラグの利用の手引書とその活用例	19
3.4 製鋼スラグの活用について	21
3.5 四日市港における製鋼スラグ中詰め鋼板セルの現地実験	22
3.6 神戸港における製鋼スラグのSCP材としての利用	23
3.7 まとめと今後の課題	23
4. 結論	23
5. あとがき	24
謝辞	25
参考文献	25

# Utilization of Fly Ash and Steel Slag

Kunio TAKAHASHI\*

## Synopsis

Coal ash and iron and steel slag are very high volume of Industrial wastes, and have been disposed in reclamation area. However, reclamation is severely restricted nowadays. Therefore, recycling utilization of these materials are requested. It is essential for "Sustainable Development".

Sand or similar materials are widely used in port construction work and the volume is very high. The author has investigated the utilization of fly ash and steel slag in port construction work. First, the properties as a material like sand has been investigated by surveys of literatures and existing data, the element tests, and field observation. Second, the behavior of the material and the serviceability of the utilization method have been examined through field tests. Fly ash has light weight and pozzolan activity, and the results have verified that it is useful material by adding a small volume of cement. Steel slag is heavy material compared with sand and has large friction angle, so that it is useful as the material for SCP.

**Keywords:** Recycle, Fly ash, Steel slug, Environment

---

\*Chief of the Soil Dynamics Laboratory, Geotechnical Engineering Division

(3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239 Japan, Tel:0468-44-5022, Fax:0468-44-0618, E-mail:takahashik@phri.go.jp)

# 石炭灰および鉄鋼スラグの活用技術

高橋邦夫\*

## 要 旨

石炭灰や鉄鋼スラグなどの産業廃棄物は、大量に埋立処分されており、これ以上の処分に困難を生じてきている。一方、港湾工事においては、砂をはじめとする良質の天然材料が不足するようになっている。リサイクル法には、石炭灰や鉄鋼スラグを指定副産物として、特に有効利用を推進するべきものとされている。また、港湾工事では、このような土砂代替材料の使用量が非常に大きいので、有効利用が進めば、その意味は極めて大きい。そこで、これら材料の有効利用のための技術開発が必要となる。

まず、文献調査、室内試験、現地調査などにより土質材料としての特性を把握し、次に現地実験により挙動の特性および施工性などを調査した。その結果、一般のフライアッシュについては、軽量であることと若干のポゾラン活性を有することを活かして、少量のセメントを混ぜて固めることにより適切な強度を持つ軽量の材料として、有効に利用できることが明らかとなった。また製鋼スラグは、膨張性を有する重い材料であり、内部摩擦角が大きいという特徴を活かすような利用法として、中詰め材料およびSCPの材料に用いた現地実験を行い、その有用性を確かめた。

キーワード：リサイクル、石炭灰、フライアッシュ、鉄鋼スラグ、製鋼スラグ、環境

---

\*土質部 動土質研究室長

(〒239 横須賀市長瀬 3-1-1, Tel:0468-44-5022, Fax:0468-44-0618, E-mail:takahashik@phri.go.jp)

## 1. まえがき

“地球に優しい”あるいは“環境”といった表現が、大事なキーワードになってきている。1992年には、リオデジャネイロにおいて地球サミットと呼ばれる国連「環境と開発」会議が行われた。また、“エコロジー”ということばも、ポピュラーな一般的に使用される言葉になっている。土木学会誌では、特別な別冊増刊号として「エコ・シビルエンジニアリング読本」<sup>1)</sup>(1992, 6), および「地球共生時代の土木」<sup>2)</sup>(1994, 4)なる特集がなされた。そして、港湾技術研究所にも1995年4月に海洋環境部が発足した。このような時代の流れの中で、港湾工事にも関連をもつことになる法律として、1991年4月に「リサイクル法」(再生資源の利用の促進に関する法律)が制定された。これは、石炭灰、鉄鋼スラグなどの産業廃棄物や浚渫土砂などの建設発生土その他の廃棄物について、特に指定して有効利用を推進することを求めている。石炭灰や鉄鋼スラグなどの産業廃棄物は、これまで有害成分を含む廃棄物として管理型の廃棄物と位置付けられ、ある程度の利用はされているものの、多くが埋立処分されていたものである。

しかし、これらの廃棄物はリサイクル法を待つまでも無く、これを材料として見れば、もともと有効に利用することが考えられて当然のものである。これらのものは、一般的に、また簡略に言って、

- ① 大量に発生する、
- ② 軽いあるいは重い、細かいあるいは粗い

などの特異な性質を持っている。第一の性質は、大量使用が普通である港湾工事にとっては大変なことであり、また逆に廃棄物の有効利用という観点から見れば、港湾利用が大量使用であることは極めて望ましい特性である。

第二の性質はそれぞれの物質の物理的性質であるが、それが良い性質であるか悪い性質であるかは、利用の仕方によることになる。後に詳しく述べるが、軽い材料は、岸壁や護岸の裏込めに使えば土圧軽減に有効である。逆に重い材料は、その重量を活かして重力式構造物の安定性を増大させられる可能性がある。細かい材料は、透水性が低いことを有効に利用できる可能性がある。粗い材料は液状化し難いことが有利だし、排水の用途に使えるかも知れない。このような技術開発はもちろん可能であり、後に述べる水砕スラグ(以前にはやはり産業廃棄物として埋立処分されていた)がそのよい例であろう。

本稿では、筆者が港湾工事における有効利用に向けて技術開発研究に携わってきたリサイクル材料として、

- a. 石炭灰
- b. 鉄鋼スラグ (1) 水砕スラグ  
(2) 製鋼スラグ

について紹介する。これらはいずれも、これまで大量に発生し扱いに困る廃棄物として埋立処分されるしかなかったものである。しかし、近年の傾向として埋立そのものがますますできなくなりつつあり、またもっと根本的に、環境に優しいやり方としてこれら大量の廃棄物を有効に利用することが極めて重要なこととなっている。

港湾技術研究所では、港湾の浚渫土砂を含めたこれらの廃棄物の有効利用を図るべく、スーパージオマテリアル(SGM)と呼んで技術開発に取り組んできた。これまで大量に使用されており、そのことがまた環境破壊の原因にもなっていた土砂は、だんだんと手に入りにくくなってきている。埋立処分するしかない廃棄物を利用することにより、貴重な良質土砂の使用を減らすという効果にも非常に大きな意義があると考えられる。

運輸省港湾局では、初の技術開発五ヶ年計画(平成8~12年度)として策定した重点項目5つのうちの一つに、リサイクル材料の実用化を挙げ、天然資材の利用を10~30%削減することを目標としている。具体的な活動として、リサイクル材料の実用化推進会議を発足させた。

## 2. 石炭灰の活用技術

### 2.1 石炭灰の概要とその活用技術開発研究の経緯

石炭灰の発生量は、1993年で電気事業から約410万トン、一般産業から約170万トン、計580万トンとなっており、これが2000年には1000万トンを越えるものと推定されている。現在、有効利用されているのはその半分程度であり、残りは産業廃棄物として埋立処分などされているのが現状である。港湾工事では1件につき使用量の大きいことが普通で、裏埋めなどに利用可能となれば、非常に有効でありかつ大量利用につながるものと期待される。

石炭灰は石炭燃焼のプロセス(図-1参照)において、どこから回収されるかにより、大きく2種類に分けられる。一つはボイラーの炉底から回収されるボトムアッシュ(クリンカーアッシュ)、もう一つはもっと後の工程で電気集塵機から回収されるフライアッシュである。前者は発生量が全体の10%程度と少なく、また



砂のような比較的よい材料であるために、有効利用は進んでいる。後者のフライアッシュの方が一般的に石炭灰と呼ばれているもので、土質分類からすればシルト～粘土に相当し、粘着性はないが化学的性質として自硬性を有する。ここでは、フライアッシュのことを一般的な表現として、石炭灰と称する。

生成後間もない灰を新生灰と称し、これに対して、加湿展圧処理などをうけ処分地において1年以上も経過したような灰を既成灰と称する。新生灰は既成灰に比べて、ポゾラン活性が高く、自硬性も相対的に高い。その自硬した強度はCaOの含有量に依存する。量的に少ないので主な対象にはしていないが、流動床という比較的新しいタイプのボイラーで燃焼した灰（流動床灰）は、特にCaO分が多く自硬性が高い。これに対して、普通石炭灰と呼ばれている量の多い一般の灰を、微粉炭燃焼灰という。

石炭灰は、現状では基本的に廃棄物であり、その有効利用に当たっては、有害物質の溶出に十分注意しなければならない。実際には、現在日本で燃されている石炭の灰に、環境上問題となるような物質が、基準に抵触する程含まれていることは、ほとんどないようである。

2.3 に述べる流動床灰の実験（平成3年）から始まって、いくつかの調査を行ってきたが、平成4年から本格的な活動に入った。通産省所管の財団法人石炭利用総合センターからの依頼を運輸省所管の財団法人沿岸開発技術研究センターが受けて、石炭灰を港湾工事用材料として有効利用するための幅広い検討をするべく委員会を設置した（委員長：長滝東京工業大学教授（当時））。平成5年からは3ヵ年計画で通産省資源エネルギー庁から予算措置が講じられ、これを使って実質的な調査研究活動を実施した。

## 2.2 石炭灰の成分および材料特性

最初の取り組みとして、平成4年から、既往文献資料を収集し、電力産業から排出される石炭灰（クリンカーアッシュを含む）の特性に関するデータの整理を行った。

引き続き、平成5年には、石炭灰の土質力学的特性を実際的に明らかにするために、2種類の調査を実施した。第一の調査では、石炭灰の物性そのものの他に、本来バラツキの大きい材料である石炭灰の、バラツキの特性を把握することをも目的とし、多くの火力発電所から採った灰の物理・化学・力学特性について

のバラツキを調べた<sup>3,5,6)</sup>。第二の調査では、2ヵ所の火力発電所を選んで、半年間の経時的な変動を調べた。これにおいては、既に捨てられた処分場の灰地盤について、地盤工学的特性を明らかにする目的で地盤調査を実施した<sup>4,7)</sup>。

以上の調査の結果の一部から、石炭灰の化学成分と物理・力学的特性を、表-1および2にまとめる。これは排出後長い時間を経っていない新生灰に関するデータで、資料の数も十分でなく、参考あるいは目安にするための数値である。

表-1 石炭灰（新生灰）の化学組成

	フライアッシュ	クリンカーアッシュ
SiO <sub>2</sub>	63±6 (%)	61±5 (%)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24±4	21±5
FeO <sub>3</sub>	4.1±2.3	5.0±2.6
CaO	2.8±2.7	2.6±2.0
MgO	1.0±0.6	1.0±0.5
未燃分	3.2±2.3	5.1±5.8

表示は(平均値±標準偏差)

表-2 石炭灰（新生灰）の物理・力学的特性

	フライアッシュ	クリンカーアッシュ
粒子密度 (g/cm <sup>3</sup> )	2.19±0.11	2.26±0.12
均等係数	5.9±3.1	14.1±7.8
シルト分 (%)	73±11	8±5
砂分 (%)	13±11	58±13
最大密度 (g/cm <sup>3</sup> )	1.13±0.18	0.83±0.17
最小密度 (g/cm <sup>3</sup> )	0.78±0.14	0.67±0.13

表示は(平均値±標準偏差)

またこれらの調査結果から、経時変化よりも燃やした石炭に起因する各発電所間の違いがずっと大きいこと、また、これまでに捨てられた処分場の地盤特性として、水面下は緩い状態で堆積しており液状化抵抗が豊浦標準砂程度であること、などがわかった。またこの調査に併せて、環境影響評価として、有害物質に関する溶出試験を実施し、全ての石炭灰について有害産業廃棄物の判定基準以下であることを確認した。

### 2.3 羽田沖展における流動床灰による軟泥土表層固化処理の現地実験

2.1に簡単に述べたように、流動床灰はCaO分を多く含み、自硬性が特に大きい。この流動床灰を軟泥土に直接混ぜることにより、地盤改良することが考えられる。そこで、羽田の沖合展開事業の軟弱地盤において、表層部分を固化して施工性を確保する実験を実施した。これは、出光石油(株)に対する技術指導として行ったものである。出光石油(株)が事前に行った室内試験の結果に基づき、表-3に示すような量の流動床灰を3ブロックに分けて投入した。混ぜている状況を写真-1に示す。現地の粘土が極めて軟弱であったために、大量の灰を混ぜることになったが、事前の室内実験、現地実験の処理地盤に対して行った試験の結果を分析することにより、以下のようなことが明らかになった。

- ①軟弱粘性土の表層固化処理材として流動床灰を粉体で用いた場合、十分な強度を発現する。
- ②その強度は、流動床灰を600kg/m<sup>3</sup>程度混ぜた場合、材令4週でN=16~17、 $q_u=6\sim7\text{kgf/cm}^2$ 程度が得られた。
- ③同量の石炭灰の配合のもとでは試料土の砂分が多いほど大きな強度を発現する。
- ④同じ試料土を用いた場合、石炭灰の添加量が多いほど大きな強度が得られる。

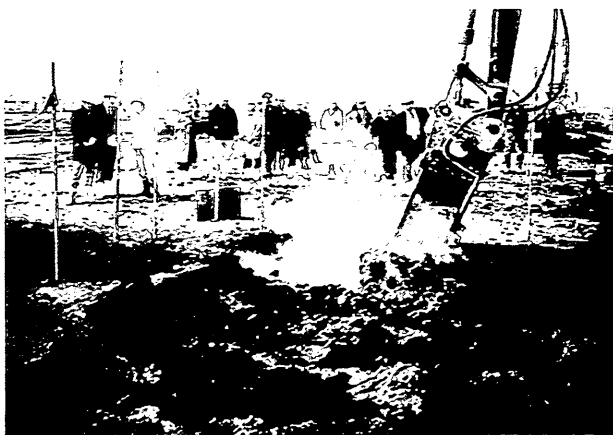


写真-1 流動床灰を混ぜている状況

表-3 投入した流動床灰の量

工区	改良土量 (m <sup>3</sup> )	石炭灰実投入量 (t)	実配合量 (kg/m <sup>3</sup> )
Aブロック	18.0	11.5	639
Bブロック	18.0	13.3	739
Cブロック	18.0	10.9	606
合計	54.0	35.7	

### 2.4 羽田沖展における石炭灰路盤の現地実験

石炭利用総合センターの依頼による実験的研究として、平成6、7年度には3種類の基礎的な現地実験を行った。すなわち、舗装材料、表層改良材料、裏埋め材料としての利用である。最初の舗装材料としての利用は、図-2および写真-2(a)、(b)に示されるような実験で、羽田空港の沖合展開事業の埋立地の中に場所を借り、平成6年8月に実施した<sup>8,9,11)</sup>。

既設埋立地を掘削・整地したのち(現場CBR=5~10%、締固度>90%)、図-2に示す実験路盤を、砂・フライアッシュ・セメントの順での撒出し→スタビライザーによる混合(4m/min)→タイヤローラー(10tf)による転圧(4km/h)の手順により作製した。表-4に示す2種類の配合に対してそれぞれ1回および2回混合部を設け、4種類の実験路盤を作製した。

この現場実験から、以下の点が明らかになった。

- ①混合材料の転圧は数回実施すればよい。

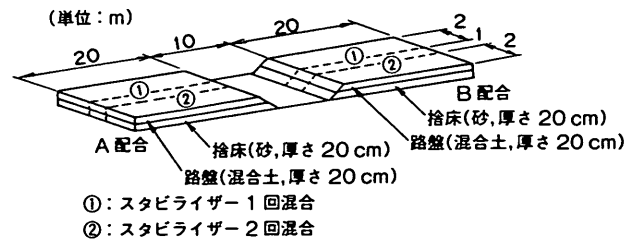


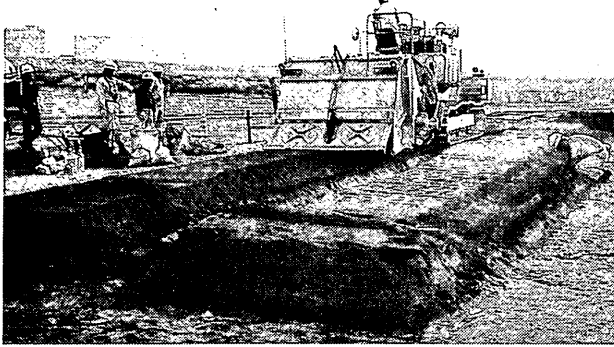
図-2 羽田沖合展開事業埋立地における石炭灰路盤実験

表-4 混合材料の配合

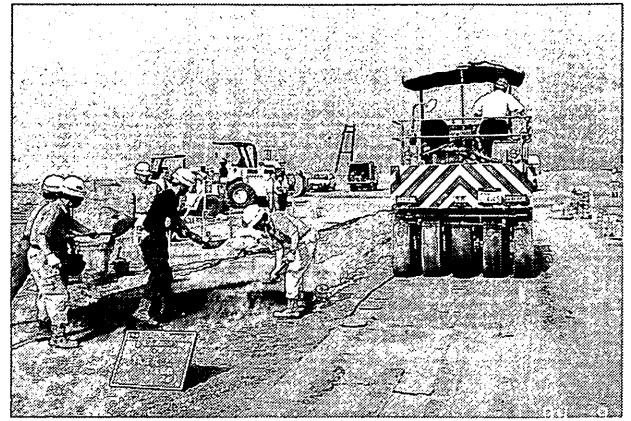
配合	F:S	C/(F+S)	目標 $q_u$ (7)
A	50:50	5%	20 kgf/cm <sup>2</sup>
B	100:0	12%	10 kgf/cm <sup>2</sup>

F、S、Cはそれぞれフライアッシュ、砂、セメントの乾燥質量。  
目標強度はφ50供試体による。





(a)スタビライザーによる混合



(b)タイヤローラーによる転圧

写真-2 羽田沖合展開事業埋立地における石炭灰路盤実験

- ②砂を添加した A 配合は混合回数と強度がよく対応しているが、砂を含まない B 配合では混合回数と強度とは必ずしも対応しない。
- ③一軸圧縮強度から判断するとフライアッシュ混合材料は下層路盤に十分適用できる。
- ④現場強度は室内強度の 60%程度に低下する。

以上の実験とその結果に基づいて、フライアッシュを路盤・路床に利用するための手引書(案)<sup>12)</sup>を作成した。

### 2.5 苅田沖合人工島における表層処理現地実験

表層処理については、九州苅田で埋立中の沖合人工島において、やはり平成6年8月実施した<sup>8,10,11)</sup>。軟弱地盤の上にセメントを2%混合し、含水比50%のスラリー状態にした石炭灰を直接打設することにより、層厚1mの硬化層を造成した。図-3および写真-3(a)に示すように幅10m×長さ30m×高さ1mの型枠を用いて打設した。打設した直後のスラリーの表面勾配は最小3.5%、最大8.4%、平均5.4%であった。また、スラリーは打設数時間でその上を歩ける程度にまで硬化し、ポータブルコンを翌朝に実施したところ

深さ5~10cmで $q_c > 20 \text{kgf/cm}^2$ が得られた。この硬化層の上に底辺4m×4m、高さ3.5mの形枠を組んで、写真-3(b)に示したような載荷試験を実施した。最終的な荷重は $5.8 \text{tf/m}^2$ であった。試験の結果を、地盤係数法と2次元弾性FEMを用いて解析した。

この現地実験により、以下のような結論が得られた。

- ①硬化後の強度から判断する限り、室内混合と現場における試験混合との間で違いは認められない。

- ②しかし、現場搬入試料の強度は事前入手試料の約半分であった。フライアッシュを活用していく上で現場での品質管理手法を開発する必要がある。
- ③地盤係数法と2次元弾性FEMによる解析は、改良体のひび割れ状況と定性的に一致し(応力の発生状況)、また、改良体の沈下挙動をうまく説明できた(弾性変位量の最大値)。
- ④最大荷重 $5.8 \text{tf/m}^2$ の載荷試験により改良体にひび割れが入ったが、致命的な破壊は生じていないと考えられ、フライアッシュを用いた改良体による表層処理の有効性が確認できた。

以上の実験とその結果に基づいて、フライアッシュを軟弱地盤の表層処理に利用するための手引書(案)<sup>13)</sup>を作成した。

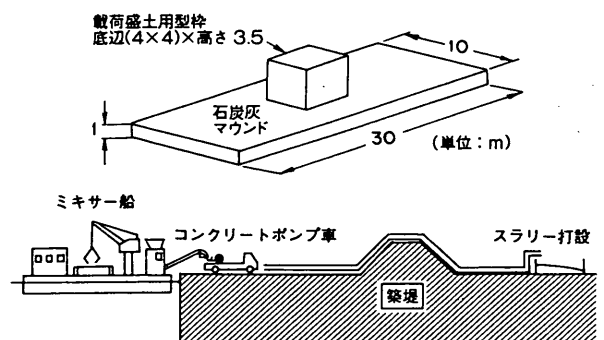
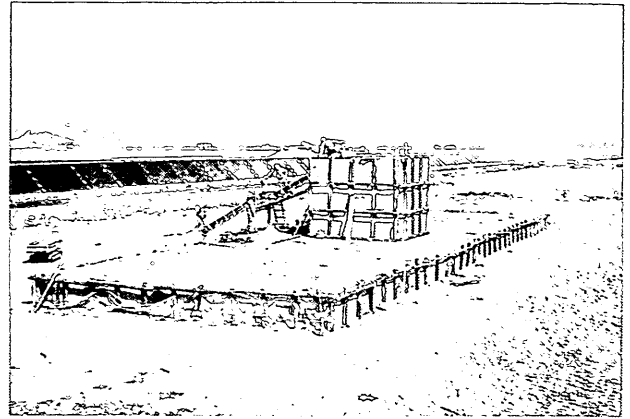


図-3 苅田沖合人工島における石炭灰マウンド載荷実験



(a) 石炭灰スラリーの打設



(b) 石炭灰マウンドの荷重状況

写真-3 荊田沖合人工島における石炭灰マウンド荷重実験

## 2.6 中部電力碧南火力発電所における土圧実証実験

港湾利用において本命と考えられるのは、岸壁や護岸の裏埋め材料としての使用である。裏込めに使用すると、海水のpHが上昇する可能性があるため、最初に一般の海域で大規模な現地実験を実施することには、同意が得られにくい。しかし、海水中に投入する場合には、海水中に多く存在する陽イオンと反応するので、pHはほとんど問題にならないというデータが、実験室レベルでは得られている。

### (1) 中部電力碧南火力発電所における土圧実証実験<sup>14)</sup>

最初の実験として、平成7年秋に、中部電力碧南火力発電所の灰捨て地第4区で、これから灰を捨て始めようとしている場所を借りて、実物大の土圧実験を行った。その様子を、写真-4に示す。灰捨て地内ということで隔離された閉鎖水域なので、環境上の問題は無い。

本実証調査の目的は、得られたデータに基づき下記の点を明らかにすることにある。

- a. スラリー打設時に壁面に作用する土圧（液圧）
- b. 硬化途中のスラリーの強度と土圧の関係
- c. 壁面に作用する主動土圧
- d. 施工上の問題点
- e. スラリーの打設が周辺環境に与える影響

そこで本実証調査は、表-5に示す5種類の調査により構成される。①が今回の現場実証調査の中核をなすもので、③では①の実施が周辺環境に与える影響を、④では①の実施時の施工上の問題点を調査した。①ではスラリー打設に時間がかかり、硬化にともなう土圧（液圧）の変化を詳細に追求することは不可能と予想されたので、②をこの点を補うために実施した。

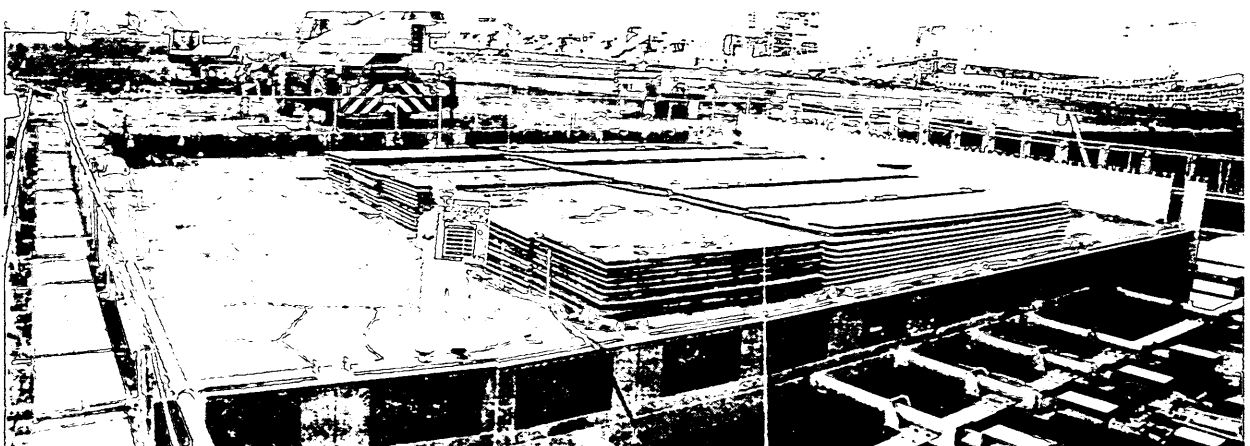


写真-4 中部電力（株）碧南火力発電所における実験の状況

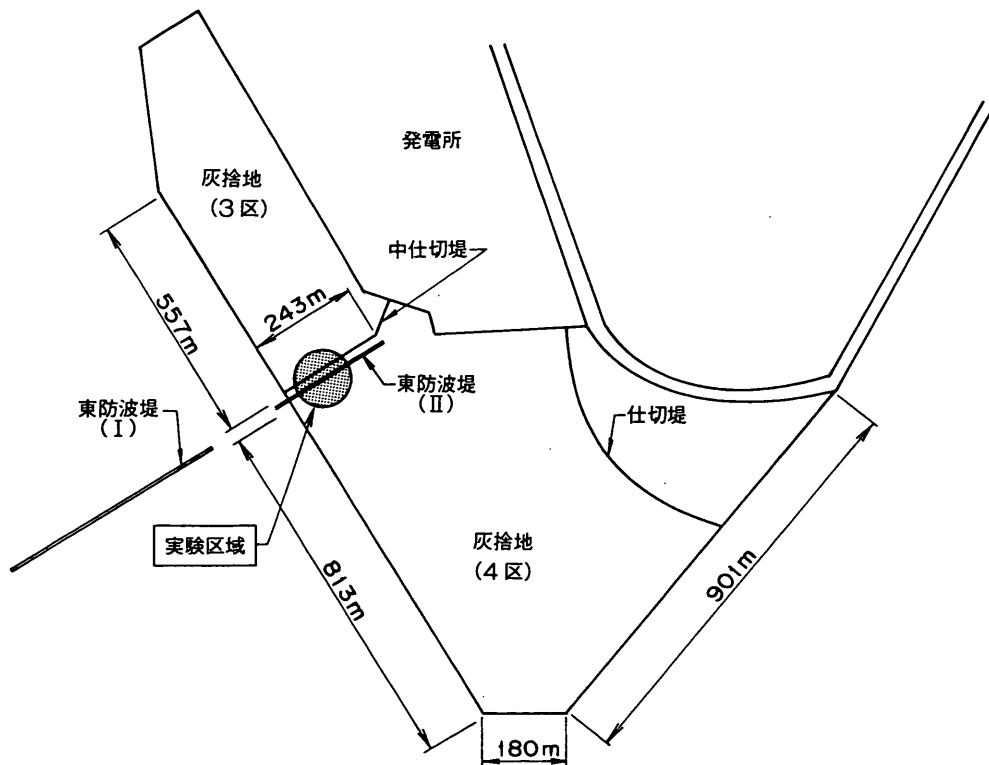
表一 5 調査内容

① 裏込め施工実験	セメントを混合したフライアッシュをスラリー状態で構造物背面に打設したときに発生する水平土圧と硬化後の主働土圧を実物規模の現場実験により検証する。また、各種土質試験により硬化体の強度を確認する。
② スラリー硬化試験	スラリーを土槽内に打設し、硬化の進行による水平土圧と強度の変化を調査する。
③ 環境影響調査	スラリー打設地点近傍のpHや濁度を調査し、周辺環境に与える影響を検証する。
④ 施工性調査	スラリーの混合から打設までの作業能率を調査し、施工上の問題点を検証する。
⑤ 灰別特性調査	化学成分の異なるフライアッシュを採取し、その力学特性の違いを調査する。

全国の発電所から発生するフライアッシュは、発電所ごとあるいは発生時期により性質が異なる。そのため、スラリーにしたときのフライアッシュの力学特性を事前に予測することは困難とされている。⑤では、フライアッシュの化学成分に着目し、スラリーの力学特性を事前に予測できる指標について検討した。

本実証調査は中部電力(株)碧南火力発電所内の灰捨地(図一4参照)にある東防波堤背面において実施した。灰捨地は、防波堤の一部を取り込んで造られており、中仕切堤と防波堤の間に水路状の部分が残されている。

図一5に打設区域の断面図を示す。ケーソン背面に鋼製の受圧板を設置し、受圧板と既設矢板のあいだに8回に分けてスラリーを打設し、硬化体を作製した。打設区域の海水位は、調査期間中大きな変動は示さず、5段目までが水中打設、6段目以降が気中打設となった。打設区域側面には、陸上であらかじめ組み立てた大組型枠を設置した。大組型枠には、水面付近に余水吐きをもうけ、打設が周辺環境に与える影響を調査した。



図一4 中部電力(株)碧南火力発電所における実験位置図

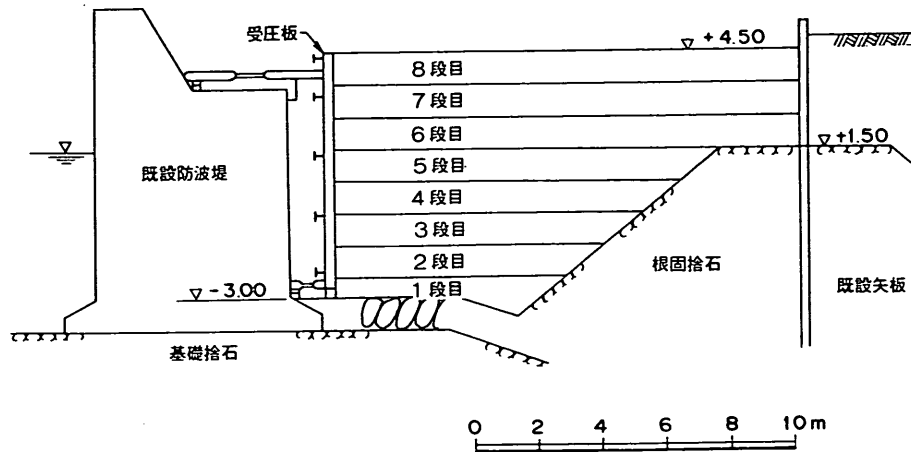


図-5 中部電力（株）碧南火力発電所における実験断面図

本実証調査結果をまとめると以下のとおりである。

【硬化体の土圧および強度について】

- ①打設完了後の水平土圧計測値から静止土圧係数は  $k_0=0.2$  程度であった。
- ②打設完了後 8 日目に受圧板をケーソン側へ回転させ主働土圧の計測を試みたが、回転終了後の土圧計測値は静水圧と一致し、硬化体は主働状態へは移行しなかったことが確認された。2.35tf/m<sup>2</sup> の上載荷重を載荷した状態で再度受圧板を回転させたが、結果は上載荷重がない場合と同様であった。

【施工性について】

- ①水中部の打設では、新規打設により既打設面が削られ、打ち継ぎ面の一体化が図られたと推察される。
- ②静穏な水域であれば、断面形状に応じた大組型枠を採用する方式は、型枠底部の固定方法を検討する必要があるが、硬化体を早く無駄なく築造する際に有効である。

【周辺環境への影響について】

- ①スラリー打設により打設区域周辺の pH は 8.5 から 9.0 へ上昇し、濁度は 5ppm から 30ppm へ上昇したが、どちらも 24 時間後には打設前の値に戻った。
- ②pH、濁度とも打設による変化は、打設区域から離れるほど、また深度が深くなるほど低下した。

(2) 遠心力荷重実験

(1)の実物大実験に対する準備という意味も含めて、軽量であり、かつ少量のセメント添加により硬化する石炭灰の土圧の検討を、遠心力荷重実験により行った<sup>15-17)</sup>。港湾技術研究所に新設された遠心力荷重実験装置（第2号機）を用いて、壁体に作用する土圧について解明すべく、条件を種々に変化させた実験を、北詰地盤改良研究室長等が実施したものである。

この実験では、①スラリー状態から固化に至る過程での土圧および強度の変化、および、②硬化体の静止土圧、主働土圧および破壊状況、の2項目について検討した。

①では、セメントを添加したフライアッシュスラリーを試料容器に投入し、投入から固化に至る過程での水平土圧の変化ならびに強度発現特性を調べた。②では、遠心模型実験装置を用いて現場規模の応力状態を再現させ、硬化体が擁壁に及ぼす土圧の深度方向分布を測定した。その際、硬化体の幅や強度を変化させ、土圧や破壊状況の変化を調査した。実験の様子は図-6に示すごとくである。②については、平成6年度にも実施している。

①の実験結果は、ここでは省略する。②の実験の結果、静止土圧については図-7、主働土圧については図-8に示すような関係を得ている。図中の計算値を求めるための式を、北詰等はこの研究に基づいて提案しているが、ここでは省略する。本研究により、少量のセメントを添加して改良されたフライアッシュの土圧が砂地盤等と比較して良好であり、この硬化体の港湾構造物への適用性の高いことが確認された。

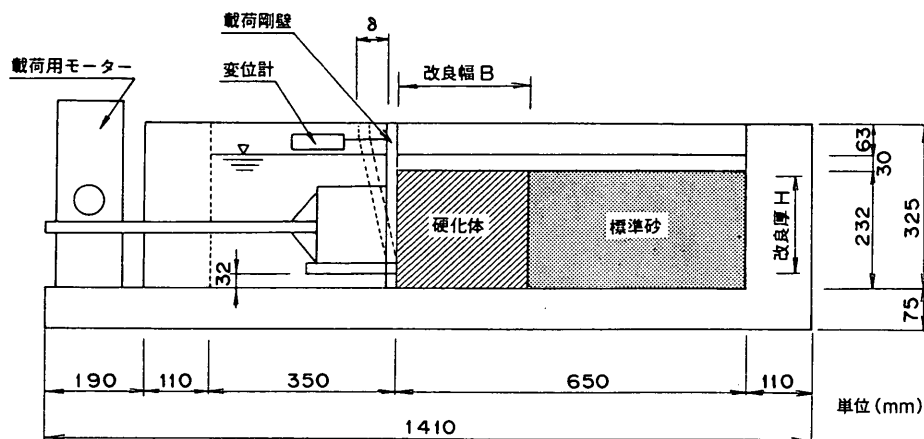


図-6 遠心力载荷実験の様子

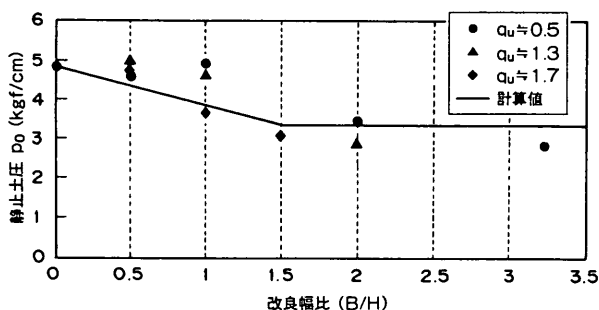


図-7 改良幅比と静止土圧の関係

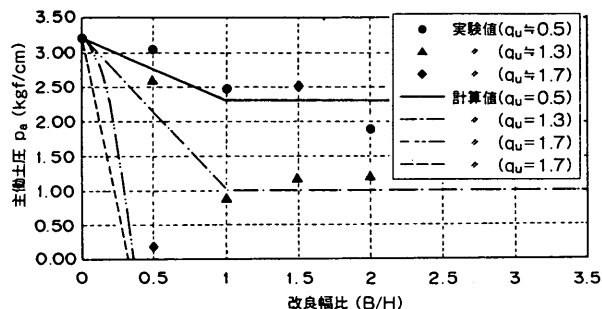


図-8 改良幅比と主動土圧の関係

## 2.7 FGC深層混合処理工法の実験

深層混合処理工法の改良材として、フライアッシュ (Fly ash)、石膏 (Gypsum)、セメント (Cement) の混合体を用いるもので、FGC工法と称している。石炭灰を主材料とし、セメント量を加減することにより、比較的小さい値で硬化強度を制御することができるというところに特徴がある。従って、改良地盤を掘削すること、また改良地盤に杭や矢板を打設することが可能である。石膏は石炭燃焼に伴い同時に発生する材料であり、これを混ぜることにより硬化の反応を促進させるまたは制御するものであるが、混ぜない場合もある。

これは元々、石炭灰の大きな排出元であり高い土木技術を持つ電源開発 (株) が技術開発した工法である。平成4年度に、川崎市の現場を借りて現地施工実験を共同研究として実施した<sup>18)</sup>。東扇島地区の粘性土地盤において、CDM (セメント深層混合) 打設機を用い、表-6のように配合を変化させたFGC改良と、比較のためのCDM改良とを実施した。試験の結果として、

図-9および10が得られた。これらによれば、図-9から、適切な配合を選ぶことにより、 $10\text{kgf/cm}^2$  以下のような低強度を達成できること、図-10から、そのような低強度では、強度のばらつき (変動係数) が、CDM工法よりも小さいこと、等が示された。

その後は、(財)沿岸開発技術研究センターに委員会を設置して、その設計法、施工法などについて引き続き総合的に検討している。<sup>34)</sup> 平成8年度には、横浜市南本牧の埋立地において、FGC改良地盤における山留め試験、鋼矢板、PHC杭、H型钢杭、鋼管杭の打設試験と掘削試験、および鋼管杭の水平载荷試験を実施した。山留め試験は、図-11に示すような、载荷盛土まで含む大掛かりなものである。そして地盤および矢板等についての詳細な計測を行った。なおこれについては、あわせて遠心力载荷模型実験によるシミュレーションも実施している。杭などの打設試験と掘削試験および杭の水平载荷試験は、図-12に示すような状況で実施した。これらの結果として、一軸圧縮強度で $5\sim 15\text{kgf/cm}^2$ 程度 (深さとともに増大する) に改良され

たFGC深層混合処理地盤において、矢板や杭などがパイプロハンマーや油圧ハンマーにより問題なく打設できること、軟岩として見た場合若干低い程度の作業

能率でバックホウにより掘削できること、そして地盤の水平抵抗反力は極めて大きいことなどが確かめられた。

表-6 FGC現場施工実験の配合

安定材種類	FGC			FGC			CDM		
水安定材比 W/FGC	1.0			1.0			1.0		
FGC 配合比	10:1:2			10:1:6			0:0:1		
添加セメント量 kg/m <sup>3</sup>	20	40	70	70	110	140	70	110	140

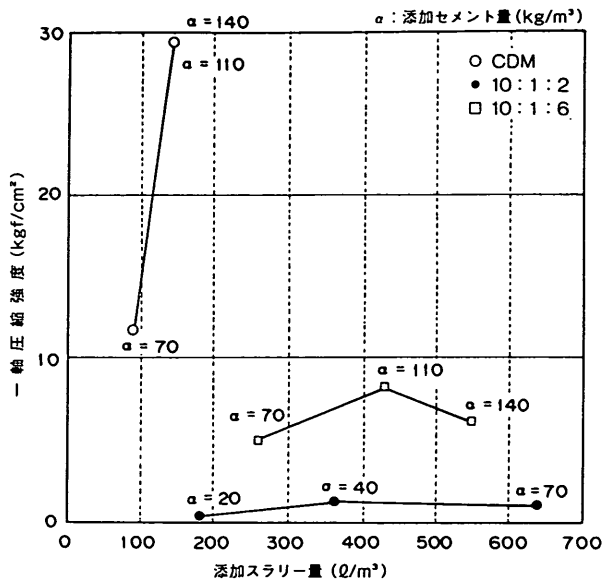


図-9 添加スラリー量と一軸圧縮強度との関係

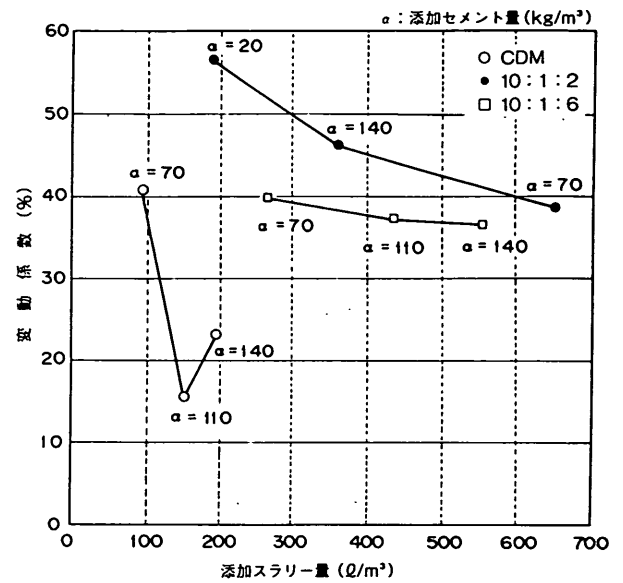


図-10 添加スラリー量と一軸圧縮強度の変動係数との関係



## 2.8 石炭灰固化物のSCP材としての検討

石炭灰に少量のセメントを添加して造粒した石炭灰固化物を、サンドコンパクションパイル（SCP）工法における砂の代替材として使用する技術が、中部電力（株）を中心にして検討されている。石炭灰固化物は、道路用盛土などはもちろんであるが、砂や碎石に比べて軽量であることを活かして、軽量盛土材や擁壁の裏込め材などとして有利であると考えられ、その方面の努力もされているようであるが、筆者は、港湾工事への適用としてSCP材としての検討に加わって

る。

中部電力（株）は、新名古屋火力発電所建設現場におけるSCP工事において、石炭灰固化物と砂との比較実験を実施した<sup>19)</sup>。図-13のような地盤において、表-7のような材料により、表-8の条件で置換率15%として施工し、図-14のような結果を得ている。石炭灰固化物がほぼ砂と同様な機能を持つ結果となったが、破碎性や透水性については更に検討を要するものとして、その後高置換率の実験を実施し、またさらに海域における実験を計画中である。

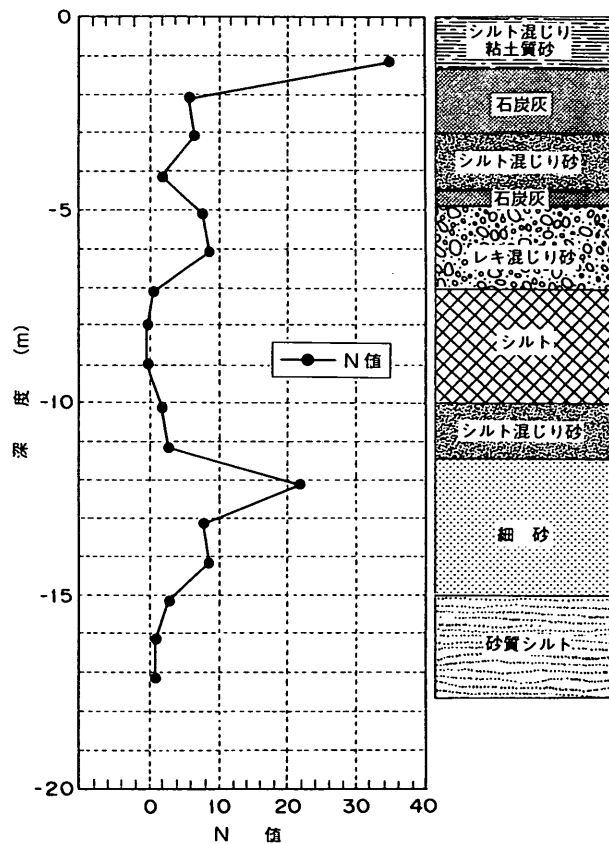


図-13 石炭灰固化物のSCP実験現場の地盤

表-7 石炭灰固化物の室内試験結果

力学特性		粒状材	破碎材	砂材	
三軸圧縮	試験条件	CD	CD	CD	
	全応力	C(kgf/cm <sup>2</sup> )	0.30	0.39	0.17
		φ(度)	41.5	38.4	38.0
透水	試験条件	定水位	定水位	定水位	
	透水係数 k <sub>15</sub> (cm/s)	5.18×10 <sup>-3</sup>	4.83×10 <sup>-3</sup>	9.00×10 <sup>-2</sup>	



表-8 石炭灰固化物のSCP現地実験の施工条件

実験ケース	中詰め材	施工仕様	施工本数
Case 1	石炭灰固化物 (粒状材)	φ700 mm×13 m 1.6 m ピッチ	16本 (予備杭：2本)
Case 2	石炭灰固化物 (破碎材)	φ700 mm×13 m 1.6 m ピッチ	予備杭 2本のみ
Case 3	砂	φ700 mm×13 m 1.6 m ピッチ	—

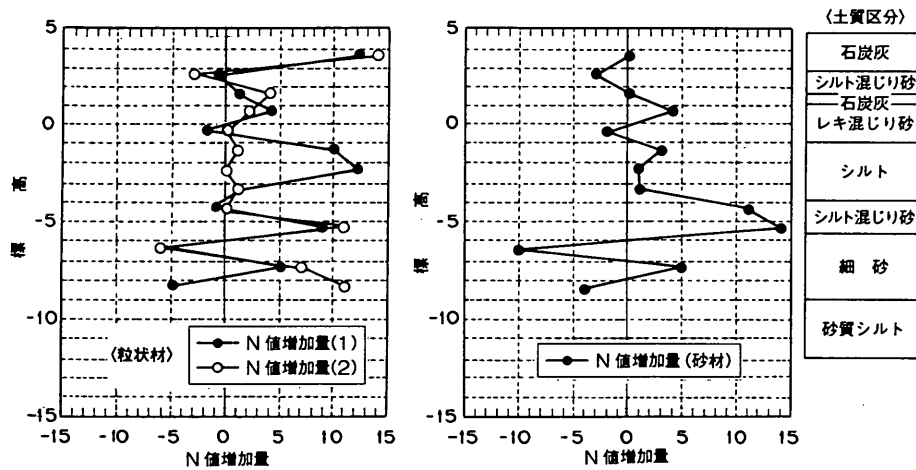


図-14 石炭灰固化物の杭間N値の増加量

### 2.9 まとめと今後の課題

港湾工事における石炭灰の有効利用のための技術開発として、これまで、以上に概略述べた知見を蓄積してきた。石炭灰は軽いというメリットを有しているので、大量利用という面も含めて、裏込め材としての使用が大きな意味を持つと考えている。注意深い観測をしながら、一つ一つの事例を積み上げてゆくことが肝要であると考えている。

### 3. 鉄鋼スラグの活用技術

#### 3.1 鉄鋼スラグの概要

鉄鋼スラグは、製鉄業から大量に発生する産業廃棄物である。鉄鋼スラグには、高炉スラグ、転炉スラグ、電気炉スラグの3種類がある。これら鉄鋼スラグの生成過程は、図-15<sup>20)</sup>に示すとおりである。転炉スラグと電気炉スラグとを併せて、製鋼スラグと呼ぶ。これらの発生量(使用量)は図-16<sup>20)</sup>のとおりである。

高炉スラグは、鉄鉱石から銑鉄をつくる過程で高炉から出てくる。製鋼スラグは、銑鉄を鋼鉄にする過程で出る。後者には、高炉メーカーの転炉から出る転炉スラグと、主に鉄屑を再生する電気炉メーカーの電気炉スラグとがある。後にも述べるが、転炉スラグ及び電気炉スラグの製鋼スラグには鉄分が多く含まれていることなどのため、高炉スラグと物理化学的性質を異

にする。

高炉スラグは、熔融状態からの処理により、徐冷スラグと急冷スラグとに大きく分けられる。徐冷スラグは、熔融状態の“ノロ”を、広くとったヤードにまきだし冷ましたもので、最も原初的な形のスラグであり、従来“鉍滓”と呼ばれていたものである。一方、熔融状態の“ノロ”を水処理により急冷し粒状としたものが水砕スラグで、徐冷スラグに比べて、それだけ処理に手間がかかっている。後に述べるが、これらの高炉スラグは有効利用が進んでおり、現状ではほぼ100%である。

製鋼スラグは、鉄分を含んでいるために重いということ、遊離CaOを含むために粒子が一部崩壊してその結果膨張するという性質を有している。このため有効利用は遅れており、道路用材などに用いられる他には、技術開発的な試みが散発的に行われてきたというのが現状である。

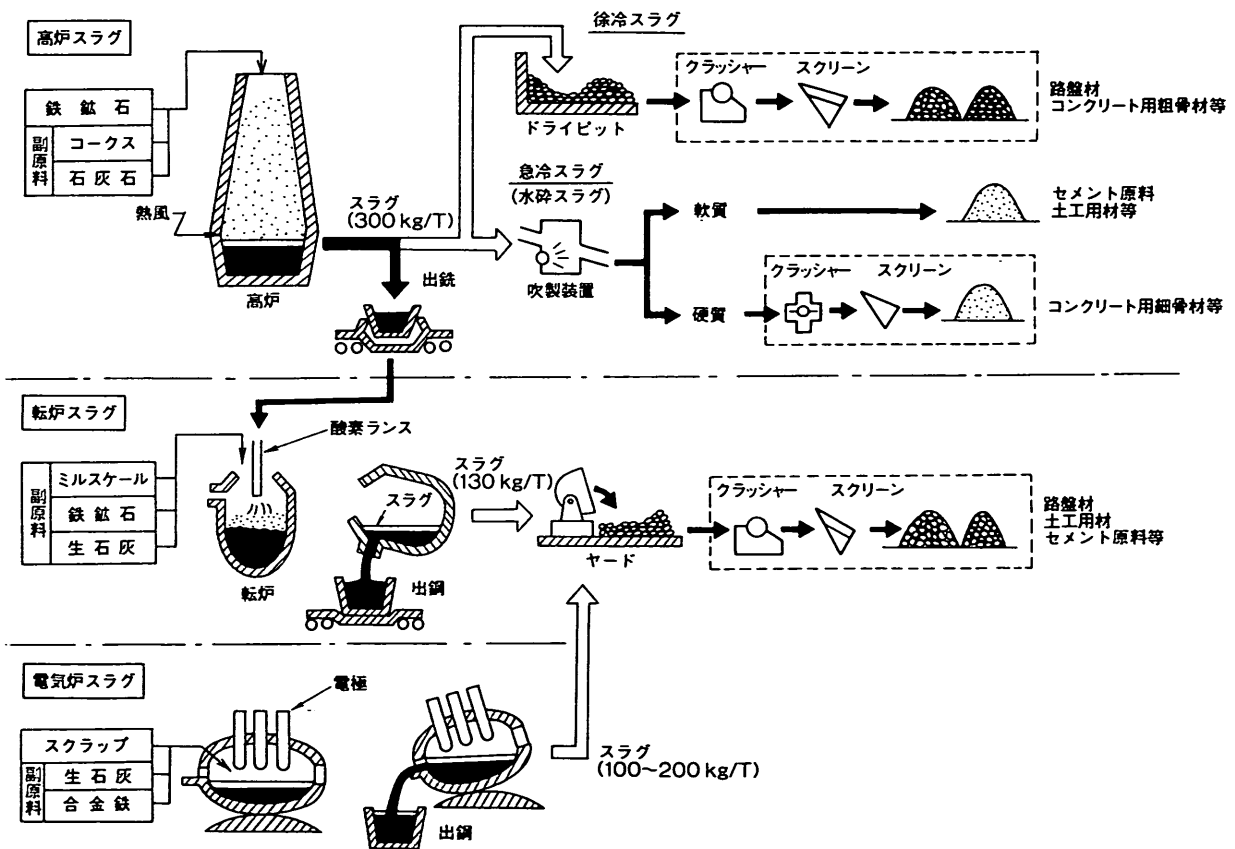
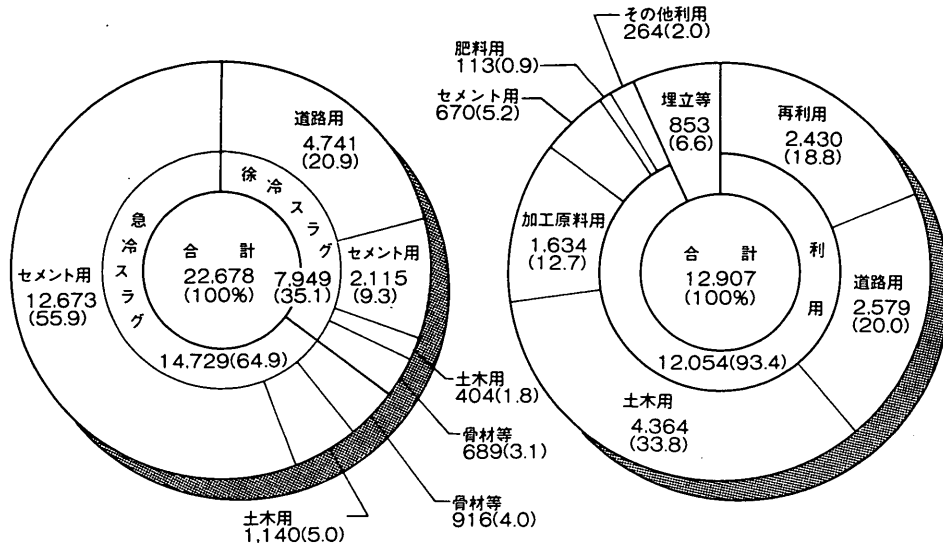


図-15 鉄鋼スラグの生成過程



(注)  
 1. 単位：千トン  
 2. ( )内は構成比 %  
 3. 自家使用を含む。  
 4. 道路用には鉄道用を、土木用には地盤改良材を含む。セメント用には輸出を含む(高炉スラグ)。  
 5. 加工用原料とは、鉄分回収用、路盤材等の原料等として外部のスラグ加工業者へ譲渡するもの。

(a) 高炉スラグ

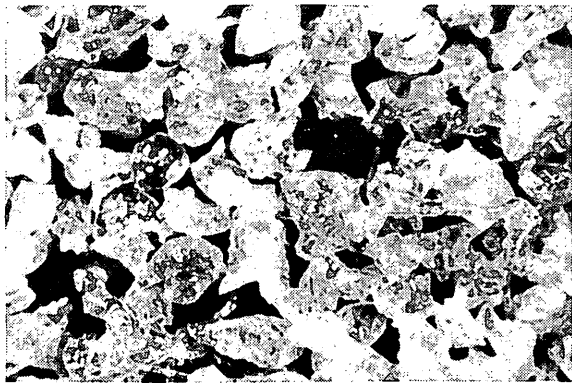
(b) 製鋼スラグ

図-16 鉄鋼スラグの用途別使用量 (平成7年度実績)

徐冷スラグ、水砕スラグ、転炉スラグの粒子を写真-5 (a)~(c)に示す。この写真ではわかりにくいですが、徐冷スラグは石ころのようであり、水砕スラグはガラス質で砂のようであり、転炉スラグは徐冷スラグと同様に粒が大きい。以下、筆者が主体的に関わってきた水砕スラグと製鋼スラグについて紹介する。



(a) 徐冷スラグ



(b) 水砕スラグ



(c) 転炉スラグ

写真-5 各種スラグの外観

### 3.2 鉄鋼スラグの成分と材料特性

各種鉄鋼スラグの化学成分を表-9に示す。いずれのスラグも化学的に安定した材料であり、問題となる重金属の溶出などはないと考えられるが、遊離CaOを含むために水中に存在する場合に、pHが高くなる。港湾利用においては、海水が対象ということになるので、海水成分による中和作用、緩衝作用および希釈の

効果により、環境に与える影響は余り問題にならないが、注意して対応すべき問題である。

物理・力学的特性については、設計に用いるに十分なデータがないのが実情である。現在収集・蓄積中であるが、これまでに得られている範囲で、数値を表-10に示す。

表-9 鉄鋼スラグの化学組成

(単位：%)

種類 成分	高炉スラグ	転炉スラグ	電気炉スラグ		山 土	安 山 岩	普 通 ポルトランド セメント
			酸化スラグ	還元スラグ			
SiO <sub>2</sub>	33.8	13.8	17.7	27.0	59.6	59.6	22.0
CaO	42.0	44.3	26.2	51.0	0.4	5.8	64.2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.4	1.5	12.2	9.0	22.0	17.3	5.5
T-Fe	0.3*	17.5	21.2	1.5	—	3.1*	3.0**
MgO	6.7	6.4	5.3	7.0	0.8	2.8	1.5
S	0.84	0.07	0.09	0.50	0.01	—	2.0***
MnO	0.3	5.3	7.9	1.0	0.1	0.2	—
TiO <sub>2</sub>	1.0	1.5	0.7	0.7	—	0.8	—

(注) \*FeOとして \*\*Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>として \*\*\*SO<sub>3</sub>として

表-10 鉄鋼スラグの物理・力学的特性

	製鋼スラグ	高 炉 ス ラ グ	
		MS-25	CS-40
絶 乾 比 重	3.19~3.40	—	—
吸 水 率 (%)	1.77~3.02	—	—
単 位 体 積 重 量 (tf/m <sup>3</sup> )	2.01~2.34	1.75~1.82	1.70~1.75
最 適 含 水 比 (%)	5.69~8.24	8.8~9.4	8.4~9.0
最 大 乾 燥 密 度 (g/cm <sup>3</sup> )	2.34~2.71	2.18~2.21	2.13~2.17
修 正 C B R (%)	78.5~135.4	170.1~203.9	152.1~185.9
透 水 係 数 (cm/sec)	10 <sup>-2</sup> ~10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-2</sup> ~10 <sup>-3</sup>	—
内 部 摩 擦 角 (度)	40~50	—	—

### 3.3 水砕スラグの利用の手引書とその活用例

20年ほど前には、高炉スラグも産業廃棄物として有効利用の程度は低く、製鉄所内の処分場に埋立処分されていた。水処理の技術により、水砕スラグという徐冷スラグと異なった性質をもつ材料をつくることはできていたが、手間がかかるにもかかわらず、利用はなかなか進まなかった。しかし、徐冷スラグの物理的性質が一般土砂とほぼ同じようであるのに対して、水砕スラグは単位体積重量が1.3tf/m<sup>3</sup>程度と軽いことから、有効に利用される可能性は高かった。特に港湾構造物

においては、港湾技術研究所が既に軽量材料による土圧低減工法の特許をもっており<sup>21,22)</sup>、水砕スラグの軽量性を活かして、護岸や岸壁の裏込め土圧低減に有効利用することは、強く期待された。

そこで昭和50年頃から鉄鋼メーカーと共同研究を始め、昭和52年には鹿児島港において現地試験も実施した。ただこの時には、水砕スラグと比較した一般土砂が鹿児島に広く分布する火山灰質の粒状土砂の”シラス”で、その時使用した水砕スラグと同程度に軽量であった。そのためデータとしてはっきりした差が得られ

なかった。逆にいうと、当時の水砕化技術は重量のばらつきが大きく、現地に搬入された水砕スラグが当初予定していた程軽量でなかった。

その後、それまでに蓄積されていた知見を総合的に検討し、(財)沿岸開発技術研究センターから利用の手引書<sup>23)</sup>として出版している。そして、港湾工事における利用として、荇田港や青森港において大量に使用された実績がある。このうち、青森港沖館地区の岸壁

に使われた例を図-17に示す。この例では、裏込め材料として水面より下に大量の水砕スラグが使用され、水面上にはEPSブロックも使われている。阪神淡路大震災において大きな被害を受けた神戸港の復旧工事においては、耐震強化方策のうちの背後地盤の土圧軽減のため、水砕スラグが大量に使用された。そのうちから摩耶埠頭岸壁(-12m)の例<sup>24)</sup>を、図-18に示す。

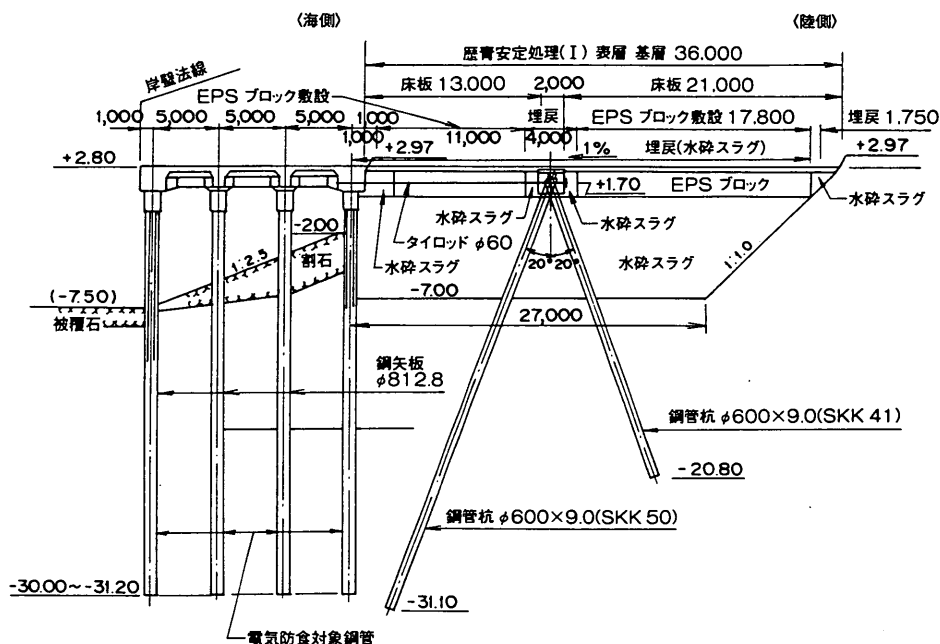


図-17 青森港沖館地区岸壁の断面図

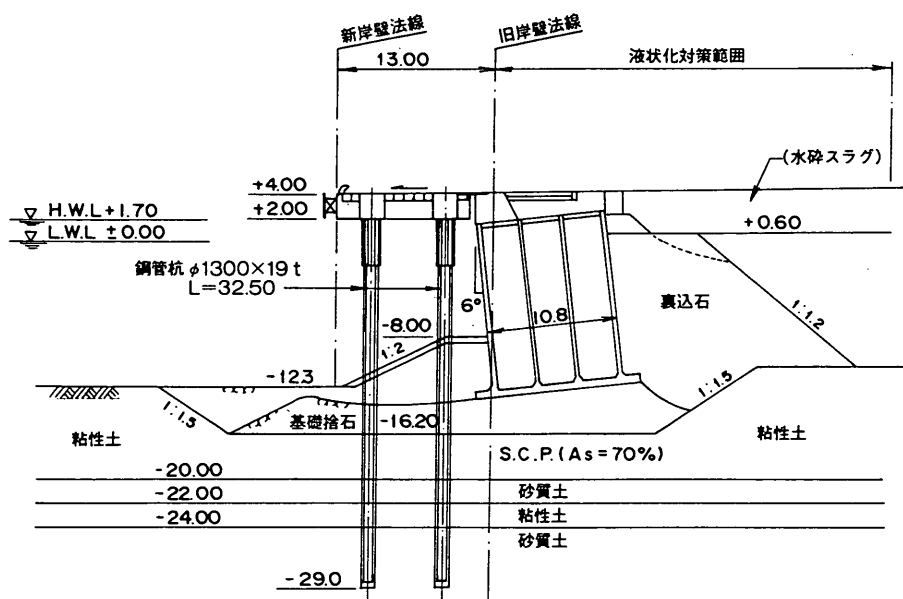


図-18 神戸港摩耶埠頭岸壁(-12m)復旧断面図

前に示した図-16 からわかるとおり高炉スラグは、徐冷スラグともども有効利用が進められて、現在ではほとんど100%になっている。また、水砕スラグの方が、徐冷スラグよりも、高炉セメント用をはじめとして有用性がさらに高いので、高炉スラグ全体の内の水砕スラグの割合（水砕化率）が高められてきている。

### 3.4 製鋼スラグの活用について

製鋼スラグは重い材料（単位体積重量が2.0～2.3tf/m<sup>3</sup>程度）であり、また膨張崩壊特性を有するために、技術的に有効利用が困難で、これまであまり進んでいない。そこで、現在はこの製鋼スラグ、なかでも特に転炉スラグについてスラグ協会と共同で利用技術の開発に取り組んでおり、港湾工事に有効に利用するための材料として広く検討している。<sup>25-27)</sup>

前に示した図-15 の生成過程に示されたとおり、転炉スラグも電気炉スラグも生石灰を副原料として使っている。これが一部遊離石灰としてスラグ中に残存し、これが水と反応するので膨張崩壊するという性質が出てくる。このため材料としての安定性を欠くことになるので、多くの場合利用にとってデメリットとなる。そこで、現在では、エージング（破碎後、空気および水と反応させること）により、実用上問題がないところまで膨張を終わらせる技術がとられている。例えば路盤材としての利用においては、膨張を1.5%以下に抑

えることが規格になっており、エージング後の試験によって確認している。

重いという性質も転炉、電気炉の両方のスラグに共通で、これはスラグの中に含まれる鉄分の量が多いことによる。一般的にいて、重い地盤材料は土圧が大きいことや地盤沈下の原因になることなど、マイナス要因が目立ちやすい。しかし、地盤改良のドレーンと組み合わせるサーチャージとしては重い方が優れていることになるし、支持力が十分であれば重力式構造物の中詰め材としても、重いことはメリットになり得る。また、膨張する性質も、コンパクションパイルの材料に使用するならば、メリットになる可能性がある。

これまでに検討してきた港湾利用における特に有望な工種を表-11<sup>26-28)</sup>に示す。これらの5工種について、試設計等の詳細な検討を行っている。

このほかの製鋼スラグの港湾区域における利用として、覆砂材への利用が検討された。内湾の開鎖性の強い海域においてしばしば問題となっている有機性ヘドロを製鋼スラグにより覆うことによって、栄養塩の溶出や硫化物の生成を物理的に遮断するための技術として有効であると考えられた。そこで、濁りの発生、有害物質の溶出、底生生物のpH影響などに関する一連の室内実験を実施した。次の段階としては、実海域実験を含めて更なる検討が必要とされている。<sup>29,30)</sup>

表-11 製鋼スラグの利用が特に有望と考えられる5工種

対象材料	工種・工法	製鋼スラグ使用の代表的な利点
地盤改良材	置換工法	安定性が大（内部摩擦角大）
	プレローディング工法	重量が大
	ドレーン工法	透水性が高い
	サンドコンパクションパイル工法	膨張することも有利である可能性
中詰め材	セルケーソン 二重矢板	安定性が大（内部摩擦角大） 重量が大

### 3.5 四日市港における製鋼スラグ中詰め鋼板セルの現地実験

中詰め材としての利用について、四日市港霞ヶ浦北埠頭地区南仮護岸において根入れ式鋼板セルの中詰めとして現地実験を実施した<sup>31)</sup>。材料はエージングをするので膨張率は小さいが、鋼板セルはそれをフープテンションの形で計測することができるので、製鋼スラグの利用の実験としては、最も望ましいケースである。

直径 13m 長さ 12.5m の鋼板セルで、根入れが 5.5m 水深は -4.5m である。このようなセル 3 函を使い、製鋼スラグの他、砂および砕石を中詰めして、比較実験を行った。セルには、ひずみゲージ、土圧計などを取り付け、中詰め時の挙動を計測したほか、セル天端のレベル測定、セル直径の変化などを測定した。結果の一部を図-19 に示す。また、製鋼スラグに接触した高 pH の海水があふれ出すので、この影響を調べるために周

囲の海水の pH を観測した。

これらの結果から以下のようなことが明らかになった。

- ①セルの中詰め土圧およびセル殻のひずみの経時変化については、スラグの膨張に起因する顕著な結果は認められず、実用上支障がないと考えられる。
- ②中詰め材に、砂、砕石、製鋼スラグのいずれを用いても、計測された中詰め土圧およびセル殻のひずみは、現行設計法による計算値よりも小さな値を示しており、現行設計法が安全であることが確かめられた。なお、特に中詰め材の内部摩擦角が大きい場合には、より安全な設計になっており、今後の検討によっては、経済的な設計を行うことができる可能性も示された。
- ③ある程度海水交換が行われる海域であれば、製鋼スラグを中詰め材として用いても、環境への影響は無視できるものと考えられる。

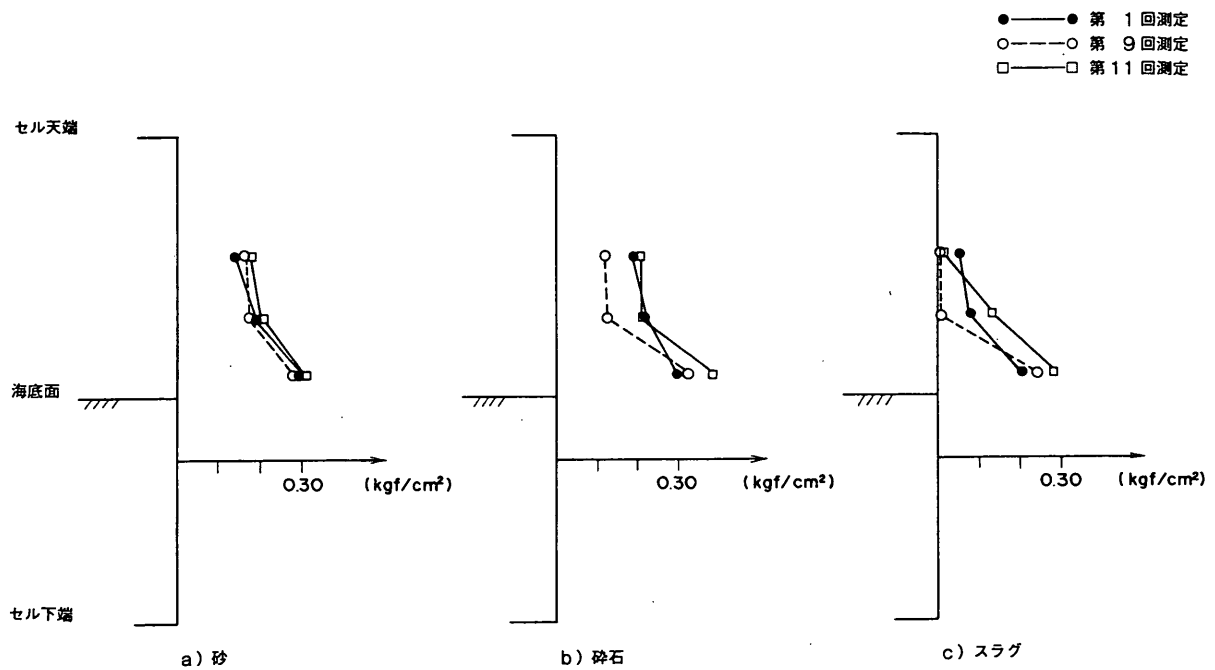
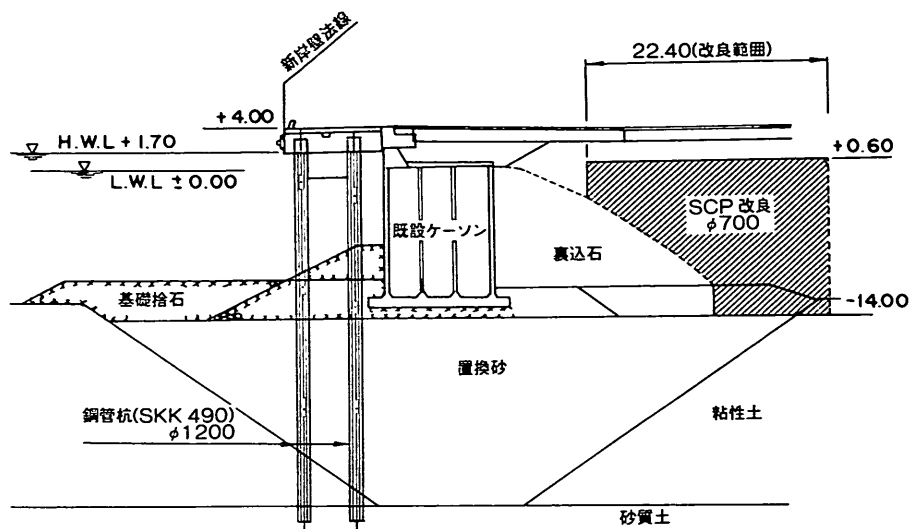


図-19 四日市港鋼板セル中詰め土圧の分布



図一20 神戸港六甲アイランドにおける製鋼スラグをSCP材に用いた試験工事の断面図

### 3.6 神戸港における製鋼スラグのSCP材としての利用

3.4 に簡単に述べたように、製鋼スラグの活用方策としてもっとも有望なものの一つにSCP材としての利用がある。そこで、神戸港六甲アイランドにおいて、護岸の裏込めの液状化防止のためのSCPの材料に、製鋼スラグを用いた試験工事を実施した。この実験においては、地震により発生した廃材としてのコンクリート殻および砂についても用い、調査した<sup>33)</sup>。

図一20 に標準断面図を示す。製鋼スラグは、φ70cmのコンパクションパイルを1.6mピッチで18×14本打設した。28.8m×22.4mの面積で、改良率は、15%である。改良前、改良直後、3ヶ月後、6ヶ月後に杭間および杭芯において標準貫入試験を実施した。また、pHの試験を杭間、杭芯の地下水、前面海水、および改良部と前面海水との間の原地盤部の地下水について実施した。

これらの結果によれば、次のようなことが明らかになった。

- ①製鋼スラグを用いたSCP工は砂と同等に施工できた。
- ②製鋼スラグを用いたSCP工の改良効果は砂と同等であった。
- ③製鋼スラグの膨張、硬化による影響は確認できなかった。
- ④pHについては、杭芯では高く、杭間でもやや高く、原地盤部でわずかに高く、海水ではほとんど変化しなかった。この傾向は、コンクリート殻を

用いた部分と同じであった。

### 3.7 まとめと今後の課題

鉄鋼スラグのうち、水砕スラグを始めとする高炉スラグは、有効利用が相当に進んでおり、残された問題は、排出量と使用量の釣り合いと調整の問題であると考えている。利用のための技術開発が必要なのは製鋼スラグで、鋭意努力をしている訳である。港湾分野における製鋼スラグの有効利用も、一歩一歩進んでおり、環境問題を含めて、有用な実例を地道に積み重ねてゆくことが肝要である。

## 4. 結論

大量に埋立処分され、これ以上の処分に困難を生じてきている産業廃棄物の石炭灰および鉄鋼スラグを、港湾工事用の材料として有効利用するための技術開発を行った。結論をまとめると、以下のようになる。

- ① 石炭灰のうち、ここに検討したフライアッシュは、軽量性ととともにポズラン活性を有している。その特徴を活かし、また利用形態に応じてセメント添加するなどして、有用材料として利用可能である。
- ② ポズラン活性の特に高い流動床灰を単体として羽田沖合展開工事の軟泥土に混ぜ、固化処理の現地実験を行い、有用な結果を得た。
- ③ 羽田沖合展開工事において、フライアッシュと少量のセメントを機械的に原地盤に混ぜ、石炭灰路



盤の現地実験を行った。その結果、下層路盤として適用できるとの結論を得た。

- ④ 荻田沖合人工島において、フライアッシュと少量のセメントをスラリー状態で軟弱地盤の表層に打設し、厚さ1mの石炭灰マウンドを造成し、表層処理地盤としての支持力試験などを実施した。その結果、仮設の表層処理地盤として十分な施工性を確保できることが明らかとなった。
- ⑤ 中部電力碧南火力発電所の灰捨て地において、フライアッシュと少量のセメントをスラリー状態で壁体の裏込めに打設し、壁にかかる土圧の実証実験を行った。その結果、土圧が大きく軽減されることが示された。
- ⑥ フライアッシュとジブサム（石膏）とセメントの混合材料を用いたFGC深層混合処理工法は、その配合によりCDM工法に比べて低強度の改良地盤の造成が可能であることが、現地実験などにより示された。
- ⑦ フライアッシュに少量のセメントを混ぜて工場製作した粒状の固化物は、SCP材として利用可能であるとの見通しが現地実験などにより得られた。
- ⑧ 鉄鋼スラグは、利用の観点から、高炉徐冷スラグ、水砕（高炉急冷）スラグ、製鋼スラグの3種類に分けられる。この内、高炉徐冷スラグは、道路用の石材などとして従来から利用されてきている。
- ⑨ 水砕スラグは、軽い砂状の材料であり、有効に利用できる。港湾工事における利用のための手引書ができており、その活用例も増えてきている。
- ⑩ 製鋼スラグは、膨張性を有する重い材料であり、内部摩擦角が大きい。その特徴を活かすような利用法について検討を進めた。
- ⑪ 四日市港において、製鋼スラグを中詰め材料に用いた鋼板セルの現地実験を実施した。その結果、現在の設計法に基づいて、製鋼スラグの中詰めが可能であることが明らかになった。
- ⑫ 神戸港において、製鋼スラグをSCP材として用いた現地実験を行った。その結果、製鋼スラグのSCP材料としての適用性が確かめられた。

## 5. あとがき

大量に排出され処分に困っている廃棄物類を、スーパージオマテリアルとして有効活用すべく、港湾技術研究所土質部を中心として精力的に研究中である。ここには、そのうちから石炭灰と鉄鋼スラグにつき紹介

した。これらの材料の有効利用には、まだまだ困難な問題が数多くあると思われるが、そのうちの2つに触れておきたい。

一つは、本文の中でも何回か触れたが、環境上の問題である。リサイクルは、焦眉の急ともいうべき要請であるが、しかしだからといって、環境上の問題を起こしても許されるというものでは決してない。事前の準備として、環境上のチェックは注意の上にも注意を重ねて、念入りになさなければならない。基本的な前提条件である。この事に関連して、現在（平成9年6月）、環境庁の研究会が作られ、リサイクルのガイドラインを策定すべく活動が行われている。筆者は、有効利用の実施を推進するための技術開発の立場から参加し、意見を述べている。

もう一つ、コストの問題を挙げておきたい。今や公共事業は経費削減を厳しく求められている。材料の値段は、トータルコストに大きく響く。現状では、有価物として利用し、値段をなるべく低く設定して在来の工法と比較し、メリットを確保しなければならない。もし、利用側が、廃棄物処理業のように、お金を取って廃棄物を引き取ることができれば、トータルコストは大幅に下げられるだろう。しかしその材料が、一朝、商品化されて市民権を得た暁には、値段が付き、その有効性に応じて高くさえなるから、トータルコストはどうしても下がらないということが生じてくる。厳しい経済原理ではあるが、これもつらい問題である。

しかしいずれにしろ、リサイクルは、“持続的発展”を続けてゆくために欠くべからざる課題である。我々技術者は、十分な注意を払いつつ、有用な技術開発に向けて、地道な努力を続けて行くべきものと考えている。皆様のご指導ご支援を切にお願いする次第である。

酒田港においては、石炭灰を裏込め材料として利用すべく検討を進めている。酒田港湾工事事務所、（財）沿岸開発技術研究センター、酒田共同火力発電株式会社の3者間で、共同研究を行い、平成9年9月末現在、施工性の調査などを含めて準備的な試験工事を実施している。

広島県においては、海砂の採取規制を実施してきており、積極的に代替材料を求めている。平成9年9月末現在、広島港における地盤改良工事のための砂代替材として、ここに紹介した製鋼スラグおよび石炭灰固化物を、SCP用の材料として利用すべく試験工事を実施している。

## 謝辞

以上の現地実験を含む調査の内容は、本文にも述べたように、その多くが財団法人沿岸開発技術研究センターの委員会活動の成果である。従って、同センターの報告書に詳しい内容が記述されている。しかし、同センターの報告書は、一般の目に触れる機会が少なく、参照しにくいと思われるので、ここに取りまとめた次第である。詳しく知りたい場合には、財団法人沿岸開発技術研究センターの報告書を参照して頂きたい。

また、石炭灰に関する 2.2, 2.4~2.6 が、財団法人石炭利用総合センターに依ることは、本文に述べた通りである。2.3 は、出光エンジニアリング株式会社と実施したものである。2.7 は電源開発株式会社、2.8 は中部電力株式会社、3 の鉄鋼スラグについては、スラグ協会の依頼により行っているものである。2.8 を除いて、著者が検討会などの長となって進めているので、港湾技研資料の形で取りまとめることとした。

以上の関係者に、記して謝意を表する次第である。

(1997年9月30日受付)

## 参考文献

- 1) 土木学会：エコ・シビルエンジニアリング読本，土木学会誌別冊増刊，Vol.77-9，1992.
- 2) 土木学会：地球共生時代の土木，土木学会誌別冊増刊，Vol.79-5，1994.
- 3) 手塚真他：電力石炭灰の性状及び土質特性，その1：新生灰の性状及び土質特性，第4回石炭利用会議，（財）石炭利用総合センター，1994.
- 4) 手塚真他：電力石炭灰の性状及び土質特性，その2：埋立処分場における既成灰の性状及び土質特性，第4回石炭利用会議，（財）石炭利用総合センター，1994.
- 5) 高橋邦夫他：電力石炭灰の土質特性（その1）—新生灰の物理・化学特性—，第30回地盤工学研究発表会，地盤工学会，1995.
- 6) 高橋邦夫他：電力石炭灰の土質特性（その2）—新生灰の力学特性及び反応性—，第30回地盤工学研究発表会，地盤工学会，1995.
- 7) 高橋邦夫他：電力石炭灰の土質特性（その3）—埋立処分場の既成灰—，第30回地盤工学研究発表会，地盤工学会，1995.
- 8) 高橋邦夫：港湾構造物の改良・更新にかかわる地盤工学上の検討，土と基礎43-2(445)，土質工学会，1995
- 9) 高橋邦夫他：フライアッシュ・砂・セメントの混
- 合材料で作製した路盤の強度特性，第31回地盤工学研究発表会，地盤工学会，1996.
- 10) 高橋邦夫他：セメントを添加したフライアッシュスラリーによる軟弱地盤の表層処理現場実験，セメント系安定処理土に関するシンポジウム，地盤工学会，1996.
- 11) （財）沿岸開発技術研究センター：平成6年度石炭灰現場実証調査設計，試験データ解析等に関する調査報告書，1995.
- 12) （財）沿岸開発技術研究センター：フライアッシュを路盤・路床に利用するための手引書（案），1995.
- 13) （財）沿岸開発技術研究センター：フライアッシュを軟弱地盤の表層処理に利用するための手引書（案），1995.
- 14) （財）沿岸開発技術研究センター：平成7年度石炭灰現場実証調査設計，試験データ解析等に関する調査報告書，1996.
- 15) 北詰昌樹，池田朋広，山根信幸：セメントで改良された石炭灰地盤の土圧に関する遠心模型実験，第30回地盤工学研究発表会，地盤工学会，1995.
- 16) 北詰昌樹，山本浩司，大石俊寛：セメントで改良された石炭灰地盤の遠心模型実験，第31回地盤工学研究発表会，地盤工学会，1996.
- 17) 北詰昌樹，山本浩司：セメントで改良された石炭灰地盤の破壊挙動と土圧に関する研究，港湾技術研究所報告，36-1，1997.
- 18) 伴一彦，浅野潤一，高橋邦夫：石炭灰を用いた深層混合処理工法の配合と改良土の工学的特性について，第50回土木学会年次学術講演会，pp.1536~1537，1995
- 19) 三浦雅彦他：石炭灰固化物を用いたサンドコンパクションパイルの現場実験，第50回土木学会年次学術講演会，1995.
- 20) 鉄鋼スラグ協会：鉄鋼スラグの特性と有用性，1997.
- 21) 中瀬明男，波木守：軽量体利用による擁壁裏込め土圧低減工法，土木学会第28回年次学術講演会概要集，第3部門，1973.
- 22) 善功企，沢口正俊，中瀬明男，高橋邦夫，橋本光寿：軽量ブロックによる土圧低減工法，港湾技術研究所報告13-2，1974.
- 23) （財）沿岸開発技術研究センター，鉄鋼スラグ協会：港湾工事用水砕スラグ利用手引書，1989.
- 24) 運輸省港湾局，運輸省港湾技術研究所，運輸省第三港湾建設局：阪神・淡路大震災による港湾施設等被災状況調査報告書（第2集），1995.

- 25) (財) 沿岸開発技術研究センター, 鉄鋼スラグ協会:平成5年度製鋼スラグの港湾工事用材料としての適用技術の研究報告書, 1994.
- 26) (財) 沿岸開発技術研究センター, 鉄鋼スラグ協会:平成6年度製鋼スラグの港湾工事用材料としての適用技術の研究報告書, 1995.
- 27) (財) 沿岸開発技術研究センター, 鉄鋼スラグ協会:平成7年度製鋼スラグの港湾工事用材料としての適用技術の研究報告書, 1996.
- 28) (財) 沿岸開発技術研究センター, 鉄鋼スラグ協会:平成7年度製鋼スラグの港湾工事用材料としての適用技術の研究試設計算書, 1996.
- 29) (財) 沿岸開発技術研究センター:平成5年度製鋼スラグの覆砂材としての適用性の調査・研究報告書, 1994.
- 30) (財) 沿岸開発技術研究センター:平成6年度製鋼スラグの覆砂材としての適用性の調査・研究報告書, 1995.
- 31) 運輸省第五港湾建設局, (財) 沿岸開発技術研究センター:平成7年度四日市港霞ヶ浦埠頭南仮護岸鋼板セル挙動調査報告書, 1996.
- 32) 村岡猛:製鋼スラグを用いたセル式護岸の試験工事報告, 土木技術資料, 51巻7号, 1996.
- 33) 及川研他:製鋼スラグ・コンクリートガラ of SCP材料への適用, 第32回地盤工学研究発表会, 地盤工学会, 1997.
- 34) (財) 沿岸開発技術研究センター:F G C深層混合処理工法[F G C-D M工法]技術資料, 港湾工事におけるF G C利用軟弱地盤改良工法の開発に関する検討会報告書, 1997.

港 湾 技 研 資 料 No. 886

1997・12

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発 行 所 運輸省港湾技術研究所

横須賀市長瀬3丁目1番1号

印 刷 所 株式会社 シ ー ケ ン

Published by the Port and Harbour Research Institute  
Nagase, Yokosuka, Japan

Copyright © (1997) by P.H.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.H.R.I.

この資料は、港湾技術研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本資料の全部又は一部の転載、複写は、港湾技術研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。