

# 銅水砕スラグを用いた SCP工法の試験施工

南 兼一郎<sup>1</sup>・松井 創<sup>2</sup>・成瀬 英治<sup>3</sup>・北詰 昌樹<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 運輸省港湾技術研究所構造部 (〒239 横須賀市長瀬3-1-1)

前：第三港湾建設局神戸調査設計事務所 (〒650 神戸市中央区海岸通)

<sup>2</sup>正会員 工修 日本鉄道建設公団工務部 (〒100 千代田区永田町2-14-2)

元：運輸省第三港湾建設局宇野港工事事務所 (〒706 玉野市宇野1-19-3)

<sup>3</sup>正会員 工修 運輸省運輸政策局総合計画課 (〒100 千代田区霞ヶ関2-1-3)

前：運輸省第三港湾建設局神戸調査設計事務所 (〒650 神戸市中央区海岸通)

<sup>4</sup>正会員 工博 運輸省港湾技術研究所土質部 (〒239 横須賀市長瀬3-1-1)

近年、サンドコンパクションパイル (SCP) 工法に適した良質の砂の確保が困難になりつつある。筆者らは、銅精錬の際に副産物として産出する銅水砕スラグのSCP工法への適用性に関する一連の研究を進めている。本稿では、銅水砕スラグを用いたSCP工法の施工性ならびに打設後のSCP杭の特性に関する試験施工について、海砂を用いた場合と比較し、スラグのSCPへの適用性を取りまとめた。

*Key Words* : sand compaction pile, field test, copper slag sand, penetration test

## 1. まえがき

サンドコンパクションパイル (以下SCPと称す) 工法は、地盤中に締め固められた砂杭群を造成する工法で、比較的短期間に改良効果が得られるため、軟弱地盤の支持力増加や矢板等の横抵抗増加の目的で港湾地域でも広く用いられている<sup>1)</sup>。同工法では砂杭のために大量の砂が必要とされるが、その材料としては、①透水性が高く、②細粒分 (74 $\mu\text{m}$  以下) の含有量が少なく、粒度分布が良く、締まりやすく、十分な強度が期待でき、かつ、③施工機械のケーシングからの排出が容易なものが望ましいとされている<sup>2)</sup>。しかし、近年では本工法に適した良質の砂の確保が困難になりつつあり、新しい材料の研究開発も進められているが<sup>3)</sup>、未だ本格的な使用には至っていない。

一方、銅精錬の際に副産物として産出する銅水砕スラグは、1991~92年には年間約 183万トン (内訳：13.8万トン (秋田県小坂町)<sup>4)</sup>、36.2万トン (福島県小名浜市)<sup>5)</sup>、23.3万トン (岡山県

玉野市)<sup>6)</sup>、42.0万トン (香川県直島町)<sup>7)</sup>、27.8万トン (愛媛県西条市)<sup>8)</sup>、40.0万トン (大分県佐賀関町)<sup>9)</sup> が産出されている。銅水砕スラグは粒子密度が砂に比べて大きく、透水性にも優れ、砂と同様の粒度分布を持つもので、これまで、土木工事には敷砂やケーソン中詰め材料として用いられてきたが、資源のリサイクル推進の観点からSCP工法の材料に適用したいとの声が近年高まっている。銅水砕スラグに関して、いくつかの室内試験が行われ、材料的にはSCP工法への適用性の高いことが言われている。しかし、スラグを用いたSCP施工事例は数例行われているものの、その施工性や改良効果について、これまで十分な検討がなされていないのが現状である。

筆者らは銅水砕スラグのSCP工法への適用性に関して、要素試験、遠心模型実験<sup>10)</sup>、<sup>11)</sup>、<sup>12)</sup> ならびに現地での施工実験<sup>13)</sup> を進めている。本稿では、一連の研究のうち施工性、打設後のSCP杭の特性に関して実施した試験施工について、海砂を用いた場合と比較して取りまとめた。

## 2. 銅水砕スラグの特性

表-1 銅水砕スラグの化学組成

試料	成分	FeO	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	その他
銅水砕スラグ		54.9%	32.4%	1.9%	5.7%	1.7%	3.4%
岩石		3.8%	59.1%	5.1%	15.3%	3.5%	13.2%

### (1) 化学・物理特性

銅水砕スラグは、銅製錬プロセスから生成するスラグを多量の流水で急速冷却し、砂状に水砕したものである。スラグは、表-1に示すような化学組成を有し、ガラス質の黒い物質である。今回の試験施工で使用した銅水砕スラグ（愛媛県西条市東予精錬所）について、金属の溶出試験を実施し、その結果を表-2に示した。表より、試験結果は環境庁の基準値を十分に満足しており、化学的性質が極めて安定しており、環境への影響も少ないことが確認できる。

表-2 銅水砕スラグの金属溶出試験結果

項目	試験結果 (単位: mg/l)	基準値 (単位: mg/l)	試験方法
カドミウム	0.002	0.1 以下	環境 庁 告 示 第 13 号
鉛	検出せず (0.01 未満)	0.1 以下	
銅	0.07	3 以下	
亜鉛	0.013	5 以下	
総水銀	検出せず (0.0005未満)	0.005 以下	
アルキル水銀	検出せず (0.0005未満)	検出されないこと	
砒素	検出せず (0.005 未満)	0.1 以下	
六価クロム	検出せず (0.04 未満)	0.5 以下	
フッ素	0.05	15 以下	
ベリリウム	検出せず (0.01 未満)	2.5 以下	
鉛クロム	検出せず (0.005 未満)	2 以下	
ニッケル	検出せず (0.01 未満)	1.2 以下	
バナジウム	検出せず (0.01 未満)	1.5 以下	
セレン	検出せず (0.01 未満)	0.1 以下	

銅水砕スラグの物理特性を表-3に、今回試験施工で使用した海砂（愛媛県伊方島産、香川県室木島産）とあわせて示した。表より、スラグの土粒子密度は3.511g/cm<sup>3</sup>と海砂の2.647g/cm<sup>3</sup>より33%程度も大きいことが分かる。それにとまって単位体積重量も16.20~21.71kN/m<sup>3</sup>と大きいことが分かる。また、要素試験中の観察より、比較的大きなスラグ粒子は指先で簡単に揉みほぐすことができたので、粒子破碎のしやすさの程度を見るため、突固めによって破碎させたスラグの単位体積重量と粒径分布もあわせて調べた。試験では、土質工学会基準（JSF T 711-1990, D法）<sup>14)</sup>に従い、突固めて粒子を破碎した。結果を表-3にあわせて示した。表より、突固めによって、砂分と細粒分が多少増加する傾向が見られるが、その変化量はわずかであり、全般的には粒子破碎の影響は小さいと考えられる。

表-3 銅水砕スラグおよび海砂の物理特性

試料	特性	土粒子 密度 g/cc <sup>3</sup>	粒度試験					単位体積重量	
			最大 粒径 (mm)	細粒 分 (%)	砂分 (%)	微分 (%)	均等 係数 (%)	最大 重量 kN/m <sup>3</sup>	最小 重量 kN/m <sup>3</sup>
銅ス ラグ	破碎前	3.511	4.75	0.0	79.0	21.0	2.2	19.94	16.20
	破碎後		4.75	2.0	91.0	7.0	2.5	21.71	17.44
海 砂	愛媛県産	2.647	9.52	0.3	92.4	7.3	4.3	**	**
	香川県産	**	**	0.0	81.0	19.0	4	**	**

\*\*：測定値なし

### (2) 力学特性

スラグの力学特性を調べるため、圧密排水（CD）三軸圧縮試験ならびに三軸供試体を用いた透水試験を実施した。なお、力学試験で使用したスラグも東予精錬所で産出したものであるが、試験施工で用いたスラグとは産出時期が異なっている。

三軸圧縮試験では、拘束圧を50~400kPaまで変化させて行った。得られた平均的な内部摩擦角（φ'<sub>o</sub>）と間隙比との関係を図-1に示した。なお、図中○で示した値は粒子破碎を受けていない試料について行ったものであり、●は先に述べた方法で粒子破碎を生じさせた試料について行ったものである。図より、供試体の密度が増加するにつれて内部摩擦角もほぼ一様に増加する傾向が見られる。粒子破碎を受けた試料は、粒子破碎を受けていない試料に比べて内部摩擦角も多少大きいことが分かる。しかし、粒子破碎を受けていない試料

の内部摩擦角と間隙比の関係の延長線上にあることから、粒子破碎が生じても力学的特性が大きく変化することがないことが分かる。図には、豊浦標準砂についてのデータもあわせて示している。図より、銅水砕スラグは間隙比の変化による内部摩擦角の変化量が豊浦標準砂よりも小さいことが分かる。そして、間隙比が1程度以下（表-3に示すデータを基に計算された相対密度で31%程度以上）で、35°程度以上の内部摩擦角が、また、間隙比が1.3程度の比較的緩い場合にも30°程度以



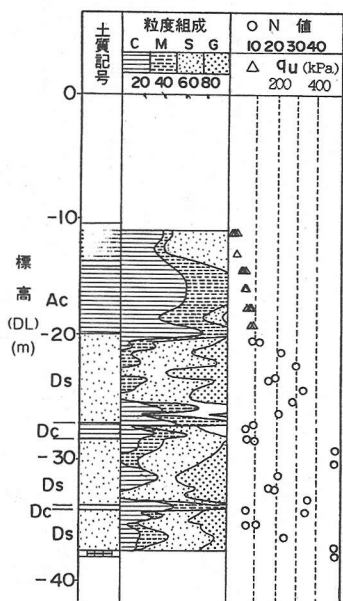


図-5 土質条件

海砂を用いる区域と銅水砕スラグを用いる区域に分け、岸壁の南東部分のおよそ 30m 四方の範囲について、銅水砕スラグを用いることとした。なお、海砂による S C P 改良は、表-2 に示した 2 種類の砂を愛媛県伯方島産砂 24%、香川県室木島産 76% の割合で混合して行った。

### (2) 土質性状

代表的な土質調査結果を図-5 に示した。現地の土質条件は、DL. -10 ~ -20m にわたって沖積粘性土層 (Ac 層) が、DL. -20 ~ -25m には洪積砂質土層 (Ds 層) が、DL. -25m 以深には洪積砂質土層に洪積粘性土がはさまれた層 (Ds 層・Dc 層) がみられる。地盤の強度を見ると、Ac 層では、DL. -10m の粘土表面から深さにほぼ比例して一軸圧縮強度 ( $q_u$ ) が増加しており、約 DL. -20m の深度での  $q_u$  は 50 ~ 110kPa の値となっている。その下部の Ds 層・Dc 層では、N 値が 10 ~ 40 の範囲に分布している。なお、今回の施工では、DL. -10 ~ -20m の沖積粘性土層 (Ac 層) が S C P 改良対象層である。

### (3) 施工の状況

S C P の施工は、銅水砕スラグと海砂の 2 ケースをあわせて平成 7 年 8 月に約 2 週間かけて行われた。工事で使用したスラグは新居浜市より 499 トン積の運搬船によって約 6 時間かけて海上輸送されたものである。スラグの単位体積重量が通常

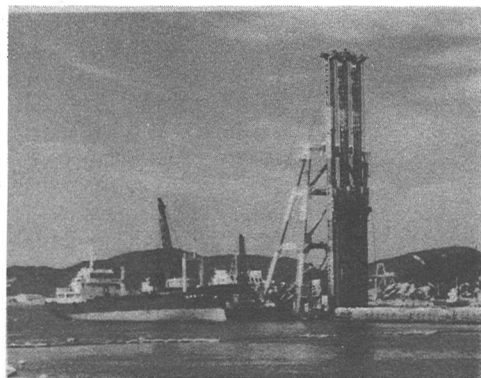


写真-1 施工状況

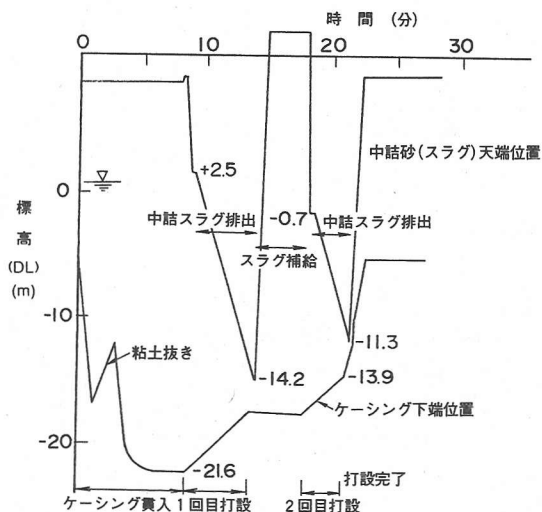


図-6 施工記録

るスラグの体積が、砂に比べ多少少なかったが、地盤改良工のスケジュールを乱すほどではなく、順調に施工された (写真-1 参照)。

本試験施工で使用した S C P 改良機は、銅水砕スラグと海砂とも同一の機械で、ケーシング先端にバイプロットと呼ばれる起震機を設置し、その水平方向の振動で砂杭を締め固めるものである<sup>17)</sup>。銅水砕スラグを用いた S C P 改良工の施工記録の一例を図-6 に示した。図には、ケーシング先端の深度とケーシング内の砂面計の記録を示している。まず、DL. -6m 位置にあるケーシングを約 6 分の間に DL. -21.6m まで貫入した。ケーシングパイプ先端には、一種の蓋が設けられているが、ケーシングの貫入時に、原地盤の粘土がケーシング内に約 2m 潜り込んでくること予備打設中に認められた。そのため、貫入の途中でケーシングを一度約 5m 引き上げ、ケーシングパイプ中に潜り込んだ粘土を抜いている。ケーシングを所定の深度

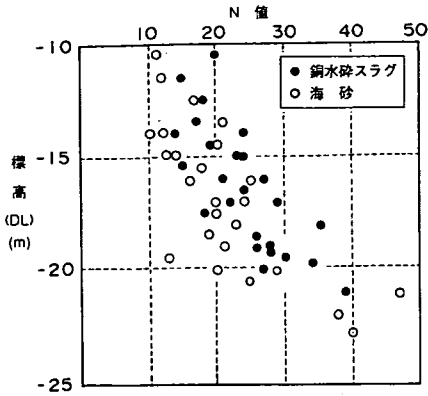


図-7 標準貫入試験結果

まで貫入した後、DL. -21.6m よりDL. -13.9m まで2回に分けてスラグ杭の打設を行っている。今回使用した施工機械は、水平方向の振動で砂杭を締め固めるものであるため、砂杭打設中もケーシングは上下動を繰り返すことなく一様に引き上げられている。

スラグ杭の第1回目の打設直前に、砂面計を降下させて、ケーシング内のDL. +2.5mの位置にスラグの上面があるのを確認している。打設中には、ケーシング内の砂が地盤中に押し出されるため、砂面はDL. +2.5mからDL. -14.2m まで低下しているのが確認できる。その後、砂面計を引き上げ、スラグをケーシング内に補給し、再度砂面計を降下させて、スラグ面位置 (DL. -0.7m) を確認している。そして、第2回目の施工では、スラグ面はDL. -0.7m からDL. -11.3m まで低下している。この手順により、内径1mのケーシングから直径2mの砂杭を造成した。2回目のSCP打設終了後、スラグを地盤中に供給せず、そのままケーシングをDL. -6m まで引き上げ、次の位置での打設を行っている。

施工記録より明らかなように、スラグ杭打設1サイクルに要する時間は23分程度である。一方、海砂を用いた場合も、同様の手順で砂杭を造成しており、1サイクルの所要時間は約22分で、銅水砕スラグを用いた場合とほぼ同じであることを確認している。さらに、SCP改良船のオペレーターからは、スラグは細粒分が少ないため、ケーシングからのスラグの抜けも良く、施工性に関しては海砂の場合と同様であるとの報告を受けている。

以上のことより、施工性に関しては、銅水砕スラグも海砂も同程度であり、これまでの施工機械でも施工可能であることが分かった。

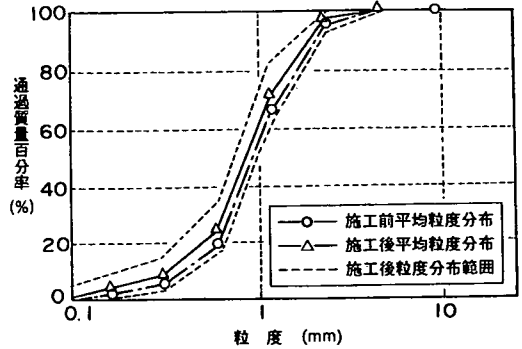


図-8 粒度分布 (施工前・施工後の比較)

#### (4) チェックボーリング結果

##### a) 標準貫入試験結果

砂杭の出来上がり状況の確認のため、図-4に示すスラグ域及び海砂域からそれぞれ3ヶ所でボーリング調査を行った。標準貫入試験は合計54回、サンプリングされたスラグの粒度分析を9試料について実施した。

図-7には、海砂ならびにスラグによるSCP改良域での標準貫入試験結果をあわせて示した。いずれの場合も、N値は深度方向にほぼ一様に増加する傾向が見られる。データにはばらつきが見られるが、全般的にはスラグの方が海砂に比べて同程度か多少大きい値を示していることが分かり、銅水砕スラグによるSCP杭が良好であることが確認できた。

##### b) 粒子破碎状況

2. の要素試験では、粒子破碎の程度がさほど大きくない結果が得られたが、実際の打設によって、どの程度の粒子破碎が生ずるのか、粒度試験を行い検討した。施工前のスラグより2試料を、施工後のチェックボーリングでサンプリングした試料より9試料を採取してフルイ分け試験を実施した。その結果を図-8に示す。図では、施工後の粒度分布のみ試験結果の範囲もあわせて示した。

図より、施工後の粒度分布は試料ごとに大きくばらついていることが分かる。しかし、その平均粒度分布曲線は施工前の平均粒度分布曲線に比べて多少上に位置しており、スラグの粗粒分が破壊されて細粒分が1~6%程度増加していることが分かる。この細粒分の増加は室内試験で得られた粒子破碎と同程度であるため(表-3参照)、強度特性や透水性等も破碎前の特性と同程度と考えられる。

#### 4. 結論

本研究より、次の結論が得られた。

- 1) 銅水砕スラグは、粒子密度が砂よりも大きい  
ため、単位体積重量も大きい。しかし、内部摩  
擦角と透水性に関しては海砂とほぼ同程度で  
ある。また、銅水砕スラグは比較的粒子破碎を  
受けやすいが、その程度は小さく、内部摩擦角や  
透水性にはほとんど影響しない。
- 2) 銅水砕スラグを用いたSCP工法は、海砂を  
用いる通常のSCP工法と、施工性や出来上がり  
杭の状況などが同程度である。
- 3) 銅水砕スラグは、砂の代替材料としてSCP  
工法への適用性の高いことが分かった。

#### あとがき

今回の試験施工は、実工事の一環で実施したも  
のであるため、スラグの特性調査、SCP施工中  
の施工状況の確認や施工後のSCP杭の強度確認  
なども、通常の工事と同程度の試験方法や試験本  
数、また計測器と計測頻度で実施された。今回の  
結果は限られた状況の下での結果であるが、砂の  
代替材料として銅水砕スラグのSCP工法への適  
用性の高いことが確認できたと考えている。他の  
スラグの適用性やSCP施工機械の種類（打ち戻  
し法や先端拡張径法など）の影響などに関しては今  
後の課題である。

現地の岸壁背後の埋立は未だ実施されていない  
ため、埋立中の改良地盤の挙動に関しては、今後  
の観測結果を待たねばならない。しかし、遠心模  
型実験より判断すると良好な改良効果が得られる  
ものと考えている。

今後、銅水砕スラグの本格的な活用に向けて、  
供給量と供給体制、価格面での検討をさらに進め  
て行く予定である。

なお、本研究を進めるにあたり、住友金属鉱山  
㈱より、銅水砕スラグの物性データの提供を受け  
た。ここに、感謝の意を表する。

#### 参考文献

- 1) 北詰昌樹：低置換率SCP工法の開発と港湾工事  
への適用，土質工学会，土と基礎，第42巻 第2  
号，pp. 31-36, 1994.
- 2) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解  
説，1989.

- 3) Okumura, T. and Kobayashi, M. : Oyster shell-sand mix  
tures material of sand compaction piles, *Proc. of the  
Second International Congress on Environmental Geo-  
technics*, Vol.2, pp.863-868, 1996.
- 4) 天満屋泰彦，松本政義，井上洋：小坂精錬所にお  
ける銅製錬（小坂製錬㈱），資源と素材，Vol. 109，  
pp. 937-942, 1993.
- 5) 大島英紀：小名浜精錬所における銅製錬（小名浜  
製錬㈱），資源と素材，Vol. 109，pp. 943-948，  
1993.
- 6) 佐々木健次：玉野精錬所における銅製錬（日比共  
同製錬㈱），資源と素材，Vol. 109，pp. 953-958，  
1993.
- 7) 阿島俊一：直島精錬所における銅製錬および副産  
物の製造（三菱マテリアル㈱），資源と素材，Vol.  
109，pp. 959-963, 1993.
- 8) 木村隆義，黒川晴正：東予精錬所における銅製錬  
（住友金属鉱山㈱），資源と素材，Vol. 109，pp.  
964-970, 1993.
- 9) 石川峯生：佐賀関精錬所の銅製錬（日鉱金属㈱），  
資源と素材，Vol. 109，pp. 971-976, 1993.
- 10) 北詰昌樹，高野重久：矢板の横抵抗に及ぼす銅水  
砕スラグを用いたSCP改良地盤の効果，第29回  
土質工学会発表会，pp. 2137-2140, 1994.
- 11) 北詰昌樹，宮島正悟，西田義忠：銅水砕スラグを  
用いたSCP改良地盤の裏込め載荷実験，土木学  
会，第50回年次学術講演会，第3部門，pp. 864-  
865, 1995.
- 12) 北詰昌樹，宮島正悟，下田義治：銅水砕スラグを  
用いたSCP改良の矢板式岸壁への効果，第31回  
地盤工学会発表会，pp. 77-78, 1996.
- 13) 南兼一郎，松井創，成瀬英治，北詰昌樹：銅水砕  
スラグを用いたSCP地盤改良工法の岸壁建設へ  
の適用，第31回地盤工学会発表会，pp. 79-80，  
1996.
- 14) 土質工学会編：土質試験の方法と解説，pp. 201-214，  
1990.
- 15) 土質工学会編：土質試験の方法と解説，pp. 285，  
1990.
- 16) 河野伊一郎，西垣誠：室内透水試験法に関する2，  
3の考察，土質工学会論文報告集，Vol. 22, No. 4，  
pp. 181-190, 1982.
- 17) (社)土質工学会編：軟弱地盤対策工法—調査・設計  
から施工まで—，第3章，1988.

(1996. 9. 12受付)

## FIELD TEST ON SAND COMPACTION PILE METHOD WITH COPPER SLAG SAND

Ken-ichiro MINAMI, Hajime MATSUI, Eiji NARUSE and Masaki KITAZUME

Sand Compaction Pile method has been widely used to improve soft clay ground. Recently limited amount of the sand suitable for the method requires investigations to find new materials for the method. Authors started a series of laboratory, model and field tests on applicability of copper slag sand, the by-product obtained from refining process of copper, as a SCP material. In this paper, outline of field construction test is described, in which construction process and profile of compacted copper slag piles are investigated. The tests show the copper slag sand has a similar material properties and is applicable as SCP material.