

# 製鋼スラグを用いて SCP 改良された 重力式岸壁の耐震性能評価

栗津 進吾<sup>1</sup>・本田 秀樹<sup>1</sup>・塩崎 禎郎<sup>1</sup>

<sup>1</sup>正会員 JFE スチール株式会社 スチール研究所 (〒210-0855 神奈川県川崎市川崎区南渡田町 1-1)  
E-mail:s-awazu@jfe-steel.co.jp

鉄鋼生産で生成される製鋼スラグは、天然砂と比べてせん断抵抗角が大きいという特性から、港湾工事におけるサンドコンパクションパイル（以下、SCP）工の中詰め材として用いられている。せん断抵抗角が大きいと、単位面積で負担できるせん断抵抗力が増大する。そのため、重力式岸壁のケーソン直下に製鋼スラグを用いた SCP 工法による地盤改良を行う場合、円弧すべりによる安定計算においては、SCP 工法の改良幅を縮小できる。一方、耐震強化岸壁においては、円弧すべりによる安定計算に加えて地震応答解析に基づく耐震性能照査が必要となる。この照査において、安定計算と同様に改良幅を低減できれば施設の建設を低コストに行うことが可能となる。そこで、室内試験による製鋼スラグの動的変形特性の評価を行い、地震応答解析における製鋼スラグ SCP 材の解析定数を提案した。さらに、提案した定数を用いて解析を行った結果、製鋼スラグを SCP 材に用いた岸壁天端の変形量は、天然砂を用いた場合と同等であった。

**Key Words:** steelmaking slag, sand compaction pile method, cyclic triaxial test, dynamic analysis

## 1. はじめに

港湾施設が整備される沿岸海域は、軟弱な粘性土地盤であることが多く、重力式などの港湾構造物を構築する際には、地盤改良が必要となる。SCP 工法は、地盤改良工法のひとつであり、SCP 杭の中詰め材には、一般的に天然砂が用いられていた。しかし、環境保全やリサイクル材の活用などの観点から、代替材の適用が検討されている<sup>1)</sup>。代替材の 1 つに製鋼スラグがある。

製鋼スラグは、鉄鋼生産において発生する副産物であり、天然砂と比べてせん断抵抗角が大きい特性を有するため、単位面積で負担できるせん断抵抗力が大きい。そのため、円弧すべりによる安定計算では、天然砂よりも SCP 改良幅を縮小することが可能である<sup>2)</sup>。一方、阪神・淡路大震災を契機として、港湾構造物の耐震設計にレベル 2 地震動の考え方が導入され、対象とする構造物の要求性能に応じた照査が必要となった<sup>3)</sup>。構造物の変形照査は、地震応答解析による方法があるが、これまで製鋼スラグの動的特性に関する検討事例は少ない。

本研究では、製鋼スラグの動的変形特性と液状化特性を明らかにするための室内試験を行い、地震応答解析に用いる製鋼スラグの解析定数を提案した。さらに、SCP 改良された重力式岸壁を対象として、SCP 材として製鋼スラグと天然砂を用いた場合の地震応答解析を行い、重力式岸壁の変形量を比較した。

## 2. 室内試験の概要

ここでは、製鋼スラグの動的特性を把握するため、変形特性を求めるための繰返し三軸試験と液状化特性を把握するための繰返し非排水三軸試験を行った。

### (1) 試験材料

試験材は、製鋼スラグと比較材としての豊浦標準砂（以下、豊浦砂）を用いた。製鋼スラグは、最大粒径 26.5 mm であり、製鋼スラグ利用技術マニュアル<sup>2)</sup>に記載されている粒度分布の中間値に調整した。試験材の粒度分布を図-1 に、物性値を表-1 に示す。試験材とした製鋼スラグの均等係数は 75、曲率係数は 2.9 であり、粒径幅の広い材料<sup>4)</sup>に分類される。

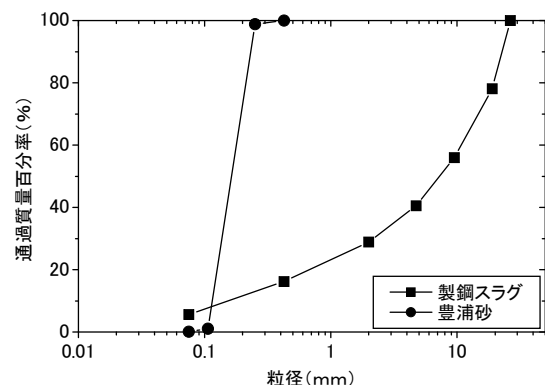


図-1 試験材の粒度分布

## (2) 試験方法

今回の試験条件を表-2 に示す。なお、製鋼スラグの最大粒径 26.5 mm であるため、三軸試験の供試体サイズは、直径 300mm×高さ 600 mm とした。

## (3) 試験結果

### a) 製鋼スラグのせん断剛性率と履歴減衰率

相対密度 80%における、製鋼スラグと豊浦砂のせん断剛性率とせん断ひずみの関係を図-2 に示す。せん断剛性率  $G$  は、繰返し載荷 10 回目の等価ヤング率  $E$  とポアソン比( $\nu=0.5$ )として求めた。その結果、製鋼スラグは、豊浦砂と比較して高いせん断剛性率を有しており、また、豊浦砂と同様に拘束圧依存性やひずみ依存性がみられた。図-3 に、H-D モデルで求めたせん断ひずみ  $1 \times 10^4$  %におけるせん断剛性率  $G_0$  で正規化したせん断剛性比とせん断ひずみの関係を示す。製鋼スラグは、豊浦砂よりも小さいひずみからせん断剛性比の低下が始まり、豊浦砂よりも低下割合が大きい。一方、せん断剛性比とせん断ひずみの関係には、豊浦砂のような拘束圧依存性は見られなかった。履歴減衰率とせん断ひずみの関係を図-4 に示す。せん断ひずみ  $5 \times 10^2$  %より小さい領域では、製鋼スラグの履歴減衰率は豊浦砂よりも大きくなっており、最大 11 %であった。

表-1 試験材の物性値

| 試験材   | $D_{50}$<br>(mm) | 密度<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 最大密度<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 最小密度<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 最大<br>間隙比 | 最小<br>間隙比 |
|-------|------------------|----------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------|-----------|
| 製鋼スラグ | 7.3              | 3.38                       | 2.64                         | 2.24                         | 0.508     | 0.281     |
| 豊浦砂   | 0.16             | 2.64                       | 1.64                         | 1.34                         | 0.980     | 0.608     |

表-2 試験条件

|                        |                       |              |
|------------------------|-----------------------|--------------|
| 変形特性を求めるための<br>繰返し三軸試験 | 相対密度 $D_r$ (%)        | 60, 80       |
|                        | 拘束圧 kN/m <sup>2</sup> | 50, 100, 200 |
|                        | 載荷周波数 Hz              | 0.1          |
| 繰返し非排水三軸試験             | 相対密度 $D_r$ (%)        | 60, 80       |
|                        | 拘束圧 kN/m <sup>2</sup> | 100          |

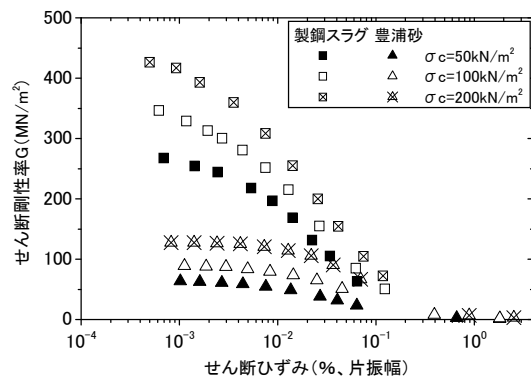


図-2 せん断剛性率  $G$  とせん断ひずみの関係( $D_r=80\%$ )

### b) 既往文献のせん断剛性率との比較

既往の検討において、国生ら<sup>5)</sup>は豊浦砂のせん断剛性率の式(1)を提案しており、また、西ら<sup>9)</sup>は、砂礫を対象とした試験の結果、式(2)を示している。そこで、今回の試験結果と既往文献との比較を行った。図-5 にせん断剛性率の比較を示す。その結果、豊浦砂の試験結果は、式(1)と同程度であった。一方、製鋼スラグは、式(2)の約 2~3 倍の値であった。西尾ら<sup>7)</sup>は、碎石の動的変形試験を行い、粒度分布の相違がせん断剛性率に影響を及ぼすことを示している。今回の実験に用いた製鋼スラグは、西らの試験材料と比較すると、最大粒径や中央粒径は同程度であるが、均等係数が異なっていた(製鋼スラグ:  $U_c=75$ , 西らの試験材:  $U_c=24$ )。これより、粒度分布における均等係数の相違が、せん断剛性率に影響しているものと考えられる。

$$G = 840 \times \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} \times (\sigma_c)^{0.4} \quad (1)$$

$$G = 500 \times \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} \times (\sigma_c)^{0.6} \quad (2)$$

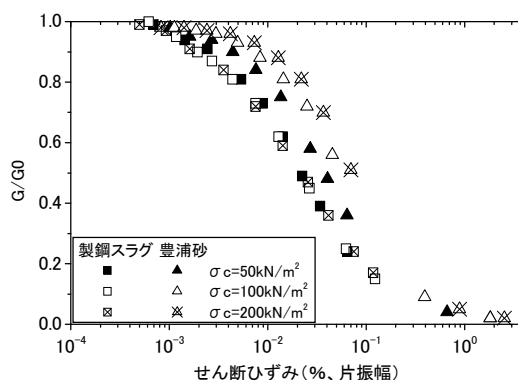


図-3 せん断剛性比  $G/G_0$  とせん断ひずみの関係( $D_r=80\%$ )

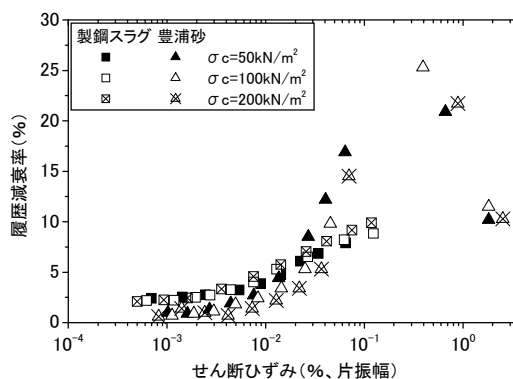


図-4 履歴減衰率とせん断ひずみの関係( $D_r=80\%$ )

### c) 製鋼スラグの液状化特性

製鋼スラグと豊浦砂の繰返し応力比と繰返し载荷回数  
の関係を図-6、図-7 に示す。図中には、液状化強度  $R_{L20}$   
(軸ひずみの両振幅  $DA=5\%$ ，繰返し回数 20 回) を示し  
ている。その結果，相対密度 60% の場合，豊浦砂の  $R_{L20}$   
 $= 0.133$  に対して，製鋼スラグの  $R_{L20} = 0.840$  であり，製  
鋼スラグは，豊浦砂に比べて液状化しにくい材料と考え  
られる。また，相対密度 80% では，豊浦砂の  $R_{L20} = 0.237$   
であったが，製鋼スラグは，試験条件とした全ての繰返  
し応力振幅比において  $DA=5\%$ ，10% に至らなかった。  
このため，液状化強度を求められなかったが， $DA=1\%$ ，  
2% の傾向から推定すると，相対密度 60% と同様に，豊

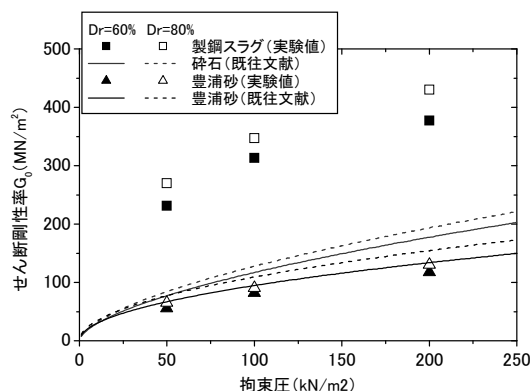


図-5 セン断剛性率の比較 (今回の試験結果と既往文献)

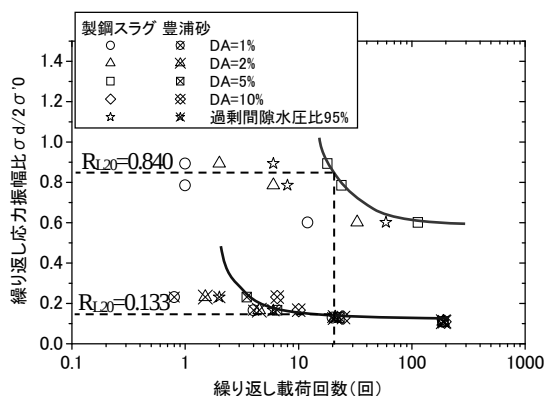


図-6 繰返し応力比と繰返し载荷回数の関係( $Dr=60\%$ )

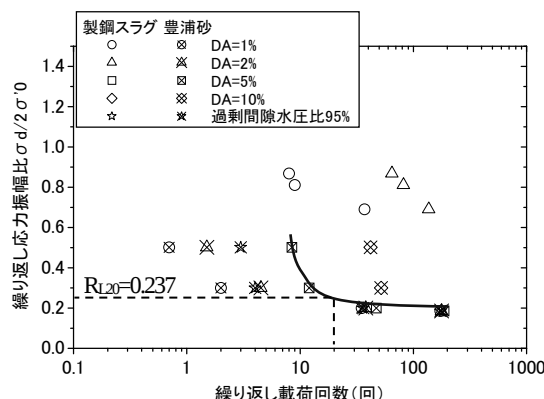


図-7 繰返し応力比と繰返し载荷回数の関係( $Dr=80\%$ )

浦砂よりも液状化強度は高く，液状化しにくい材料であ  
ると思われる。

図-8 に，繰返し応力比 0.130 (相対密度 60%) におけ  
る豊浦砂の繰返し非排水三軸試験結果を示す。豊浦砂は，  
载荷回数とともに過剰間隙水圧が徐々に増加している。  
軸ひずみ振幅は，当初非常に小さいが，载荷回数 20 回  
を超えると急激に増加しており，液状化状態と考えられ  
る。一方，図-9 は繰返し応力比 0.894 (相対密度 60%)  
における製鋼スラグの試験結果を示す。製鋼スラグの過  
剰間隙水圧は大きく変動しており，正のダイレイタンス  
を生じている。また，軸ひずみ振幅は伸張側に偏って  
おり，豊浦砂と比較して密な材料特性と考えられる。応  
力経路を比較すると，豊浦砂は，過剰間隙水圧の増加に  
より，有効応力が単調に減少した後，破壊包絡線に沿う  
ように有効応力が回復するサイクリックモビリティ現象  
がみられた。また，図-10 は製鋼スラグの試験条件で最  
も繰返し応力比の小さい条件 (繰返し応力比 0.602) の  
試験結果である。軸ひずみや過剰間隙水圧比の経時変化  
は，繰返し応力比 0.894 (図-9 参照) と同様であり，過  
剰間隙水圧比 0.95 程度に至っても軸ひずみの急激な増  
加はみられなかった。以上のことから，製鋼スラグは，  
液状化しにくい材料であり，今回の試験条件では，液状  
化が生じていないものと考えられる。

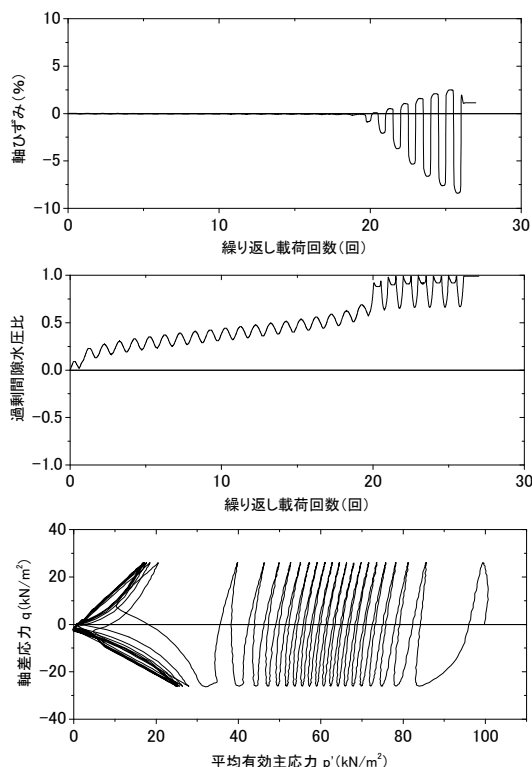


図-8 豊浦砂の繰返し非排水三軸試験結果  
( $Dr=60\%$ ，繰返し応力振幅比 0.130)

### 3. 数値解析による評価

#### (1) 数値解析の概要

##### a) 対象断面

解析対象とした重力式岸壁の断面を図-11に示す。断面は製鋼スラグ利用技術マニュアル<sup>2)</sup>の設計例より引用した。照査用震度 0.17 としたときの円弧すべり計算の結果、SCP 改良率 78.5%において製鋼スラグを用いた SCP 改良幅は 20.5m、天然砂を用いた SCP 改良幅は 24.5m であり、改良幅が約 20%縮小されている。

##### b) 解析条件

解析は数値解析プログラム FLIP<sup>®</sup>を用いて行った。解析定数を表-2に示す。SCP 改良部の解析定数に関して、天然砂の変形特性は「港湾構造物設計事例集<sup>9)</sup>」に準じて、液状化特性の設定なし、等価 N 値 20 と仮定して FLIP の簡易設定法により設定<sup>10)</sup>とした。製鋼スラグの変形特性については、前章の室内試験において豊浦砂と比較してせん断剛性率と液状化強度が高かったことから、液状化特性の設定なし、剛性に関するパラメータは安全側を見て天然砂と同じ値とした。また、せん断抵抗角については製鋼スラグ利用技術マニュアル<sup>2)</sup>の三軸圧縮試験データをもとに、製鋼スラグにおける相対密度とせん断抵抗角の関係を決め、等価 N 値 20 に対する値を算定した。相対密度については、式(3)に示す Meyerhof の式

を用いて等価 N 値と有効上載圧  $\sigma'_v$  から計算している。

$$D_r = 21 \sqrt{\frac{N}{\frac{98}{\sigma'_v} + 0.7}} \quad (3)$$

天然砂と製鋼スラグの相対密度と内部摩擦角の関係を図-12に示す。SCP 改良地盤の以外の解析定数に関しては、設計事例集において FLIP による解析で用いられている値を設定した。その他の解析諸条件を表-3に示す。

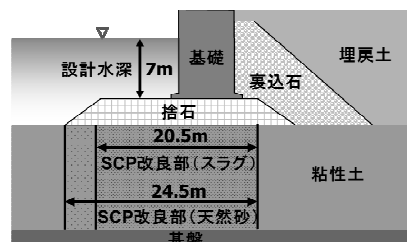


図-11 解析対象断面

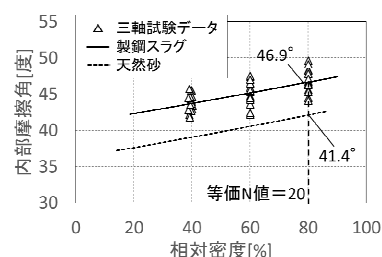


図-12 内部摩擦角と相対密度の関係

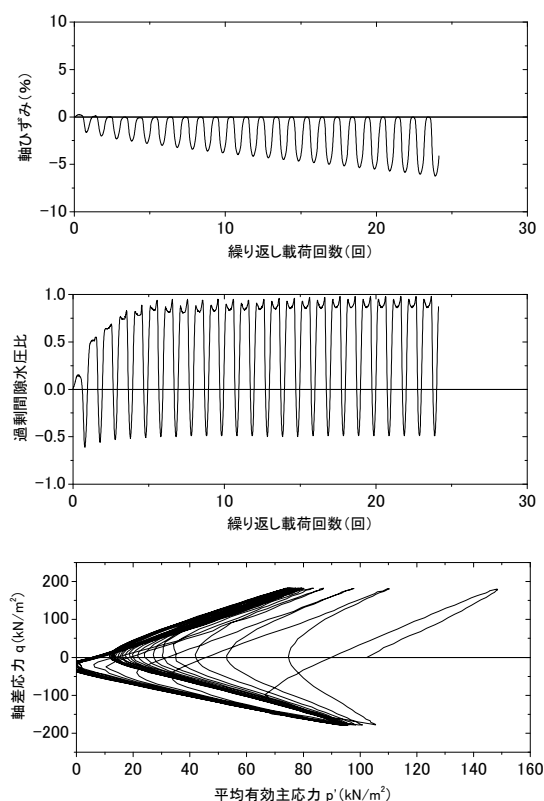


図-9 製鋼スラグの繰返し非排水三軸試験結果  
( $D_r=60\%$ , 繰返し応力振幅比 0.894)

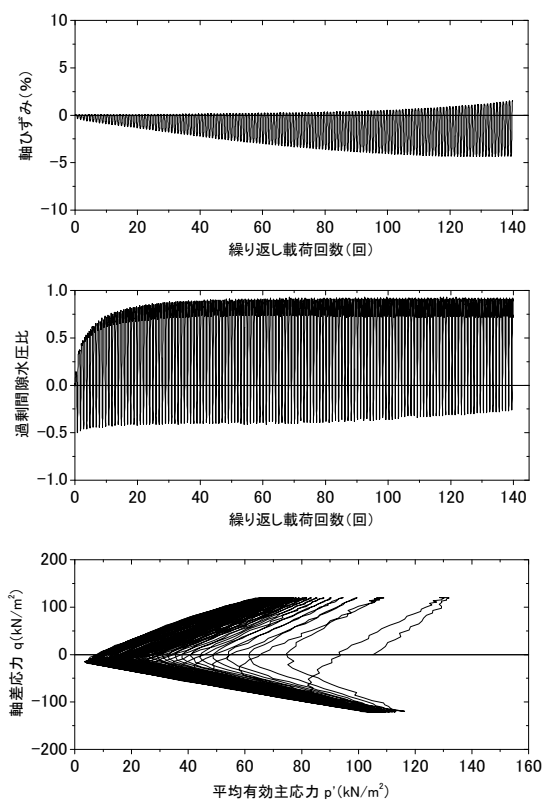


図-10 製鋼スラグの繰返し非排水三軸試験結果  
( $D_r=60\%$ , 繰返し応力振幅比 0.602)

入力地震動は港湾用のレベル1地震動として公開されている波形から、卓越周期の異なる4波を選択した<sup>14)</sup>。入力加速度振幅は照査用震度0.17となるように、1次元地震応答解析で決定した。時刻歴波形を図-13に示す。

## (2) 解析結果

港湾基準<sup>3)</sup>では、重力式岸壁の地震時における照査項目として、地震応答解析時の岸壁天端の水平残留変位を定めている。本論文でも、岸壁天端の水平残留変位について、天然砂SCPとスラグSCPとで比較した。結果を図-14に示す。地震波による大きな違いは現れず、天然砂SCPとスラグSCPとで岸壁天端の残留水平変位は同等の結果となった。釧路港波を入力したときの、変形図と岸壁天端の水平変位および水平加速度の時刻歴を比較したが、大きな違いは見られなかった(図-15参照)。

釧路港波の計算結果について、せん断応力 $\tau_{xy}$ のコンター図を図-16(a)に、SCP改良部のせん断力を図-16(b)に、せん断応力 $\tau_{xy}$ 分布およびせん断ひずみ $\gamma_{xy}$ 分布をそれぞれ図-16(c)および図-16(d)に示す。(b)は図中の点線で囲まれたSCP改良部について、高さごとに、せん断応力 $\tau_{xy}$ とメッシュ面積を乗じて求めたせん断力の合計を比較している。スラグSCPは改良幅が小さいが天然砂SCPよりも大きいせん断力が出ていることが分かった。

また、(c)と(d)より、スラグSCPでは天然砂SCPと比較してSCP改良部のせん断応力が大きくなっていること、一方せん断ひずみは同等となっていることが確認できた。

水平変位のコンター図を図-17(a)に、岸壁天端に鉛直な列の水平変位分布、せん断ひずみおよび軸差ひずみの分布を図-17(b)に示す。スラグSCPと天然砂SCPとで、岸壁天端の列のせん断ひずみおよび軸差ひずみが同等であり、水平変位も同等であることが分かる。これらの結果により、両岸壁構造の残留変位に大きな違いが出ない理由は、製鋼スラグのせん断抵抗角が天然砂よりも大きいことにより、SCP改良幅を縮小しても天然砂SCP以上のせん断力が発揮され、ケーソン直下におけるせん断ひずみおよび軸差ひずみが同等となっているからであると推測できる。

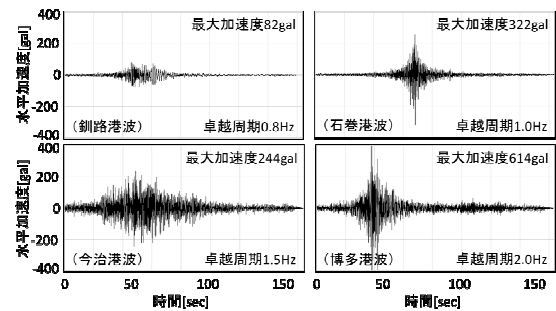


図-13 入力地震動の時刻歴波形(振幅調整)

表-2 解析で用いた地盤定数

| 土層名                           | 埋立土      | 捨石・裏込石   | 粘性土層     | SCP      |          |
|-------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 土質                            | 砂質土      | 捨石       | 沖積粘土     | 天然砂      | スラグ      |
| 湿潤密度[kN/m <sup>3</sup> ]      | 18.0     | 18.0     | 14.0     | 18.0     | 23.0     |
| 水中密度[kN/m <sup>3</sup> ]      | 10.0     | 10.0     | 4.0      | 10.0     | 16.0     |
| 間隙率                           | 0.45     | 0.45     | 0.55     | 0.45     | 0.45     |
| ポアソン比                         | 0.33     | 0.33     | 0.33     | 0.33     | 0.33     |
| 基準有効拘束圧[kN/m <sup>2</sup> ]   | 98.0     | 98.0     | 154.7    | 98.0     | 98.0     |
| 基準初期せん断剛性[kN/m <sup>2</sup> ] | 7.38E+04 | 1.80E+05 | 2.62E+04 | 1.31E+05 | 1.31E+05 |
| 基準初期体積剛性[kN/m <sup>2</sup> ]  | 1.93E+05 | 4.69E+05 | 6.83E+05 | 3.43E+05 | 3.43E+05 |
| 有効拘束圧依存性 $m_v, m_c$           | 0.5      | 0.5      | 0.5      | 0.5      | 0.5      |
| 水の体積弾性係数[kN/m <sup>2</sup> ]  | 2.20E+06 | 2.20E+06 | 2.20E+06 | 2.20E+06 | 2.20E+06 |
| 最大減衰                          | 0.2      | 0.3      | 0.2      | 0.2      | 0.2      |
| 内部摩擦角[°]                      | 39.0     | 35.0     | 30       | 41.4     | 46.9     |
| 粘着力[kN/m <sup>2</sup> ]       | 0        | 20       | 0        | 0        | 0        |
| 変相角[°]                        | 28.0     | -        | -        | -        | -        |
| 液状化パラメータ                      | s1       | 0.005    | -        | -        | -        |
|                               | w1       | 6        | -        | -        | -        |
|                               | p1       | 0.50     | -        | -        | -        |
|                               | p2       | 0.94     | -        | -        | -        |
|                               | c1       | 2.6      | -        | -        | -        |

表-3 解析の諸条件

| 項目         | 手法                                                                                                                                                    |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 初期自重解析     | 1段階: 粘性土・SCP改良部 2段階: 捨石<br>3段階: ケーソン 4段階: 裏込石・埋立土                                                                                                     |
| SCP改良率の表現法 | ・剛性に関するパラメータに改良率を乗じる<br>・単位重量はSCP材と沖積粘土の重み付き平均                                                                                                        |
| ケーソン       | ・線形平面要素でモデル化<br>・背面および底面にジョイント要素を配置<br>・垂直方向剛性および接線方向剛性: 10 <sup>6</sup> Kpa<br>・背面のジョイントの摩擦角: 15度<br>・底面のジョイントの摩擦角: 31度<br>・ジョイント要素のレーレー減衰 $\beta=0$ |
| 数値解析法      | Wilson $\theta$ 法, $\Delta t=0.01s$                                                                                                                   |
| レーレー減衰     | $\alpha=0$ , $\beta=0.0022$                                                                                                                           |

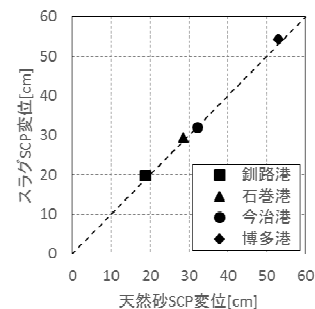


図-14 岸壁天端の残留水平変位

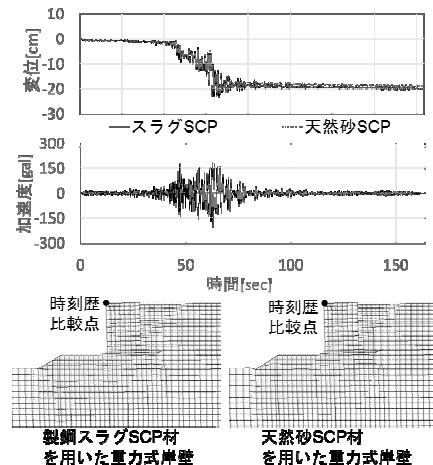


図-15 主要部の残留変形図、岸壁天端の水平変位及び加速度の時刻歴の比較

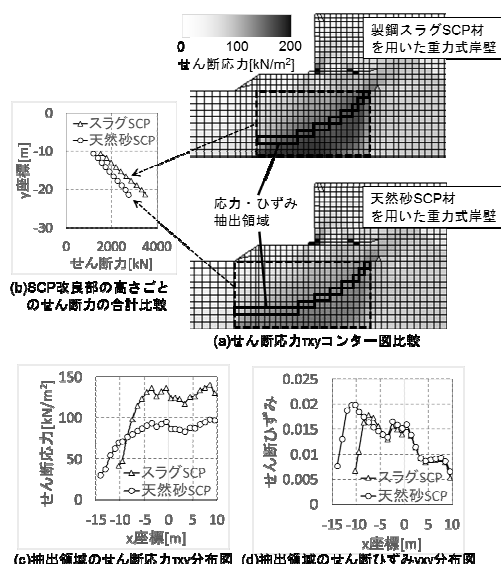


図-16 解析結果 (SCP改良部のせん断力)

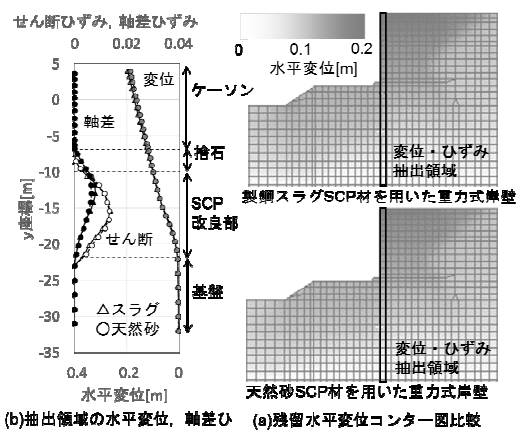


図-17 解析結果 (残留水平変位)

スラグ SCP 材と天然砂 SCP 材とを比較したところ、円弧すべり安定計算の結果と同様に、SCP 改良幅を縮小しても岸壁天端の残留水平変位は同等となった。

#### 4. まとめ

本研究では、製鋼スラグで SCP 改良された施設の耐震性能照査を行うため、スラグの動的特性を明らかにするための室内試験を行い、FLIP を用いた解析における解析定数を提案した。また、地震応答解析による天然砂 SCP 材との比較を行い、SCP 改良幅を縮小しても同等の性能を発揮することを確認した。結論を以下に示す。

- ・変形特性を求めるための繰り返し三軸試験を実施したところ、製鋼スラグは豊浦砂と比較して高いせん断剛性率を有していることが確認できた。
- ・液状化特性を調べるため、繰り返し非排水三軸試験を行い、製鋼スラグの液状化強度が豊浦砂よりも高く、液状化しにくい材料であることを確認した。
- ・今回の室内試験結果と製鋼スラグの三軸圧縮試験データより、製鋼スラグ SCP 材の FLIP を用いた解析における解析定数を提案した。剛性に関する定数については、安全側を見て天然砂 SCP 材と同等の値とした。
- ・重力式係船岸を対象として地震応答解析を行い、製鋼

#### 参考文献

- 1) 国土交通省：港湾・空港等整備におけるリサイクルガイドライン（改訂），2015。
- 2) 一般財団法人 沿岸技術研究センター：港湾・空港・海岸等における製鋼スラグ利用技術マニュアル，2015。
- 3) 公益社団法人 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，2007。
- 4) 公益社団法人 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説-二分冊の1-，2009。
- 5) 国生剛治，桜井彰雄，江刺靖行：三軸試験装置を用いた微小ひずみから大ひずみまでの土質動的試験法の開発と砂の物性試験への適用，電力中央研究所研究報告，No.379002，1979。
- 6) 西好一，吉田保夫，沢田義博，岩楯敏広，国生剛治，花田和史：JPDR（動力試験炉）を対象とした構造物-地盤系の動特性，電力中央研究所研究報告，1983。
- 7) 西尾伸也，玉置克之，町田泰法：大型三軸試験装置による砕石の動的変形特性，第 20 回土質工学研究発表会，1985。
- 8) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, 1992。
- 9) 一般財団法人 沿岸技術研究センター：港湾構造物設計事例集，2007。
- 10) 森田年一，井合進，Hanlong Liu，一井康二，佐藤幸博：液状化による構造物被害予測プログラム FLIP において必要な各種パラメタの簡易設定法，港湾技研資料，1997。
- 11) 国土技術政策総合研究所港湾施設研究室：<http://www.ysk.nilim.go.jp/kakubu/kouwan/sisetu/sisetu.h.html>。

(2016.9.2 受付)

## SEISMIC PERFORMANCE EVALUATION OF GRAVITY TYPE QUAY WALL IMPROVED BY STEELMAKING SLAG COMPACTION PILE METHOD

Shingo AWAZU, Hideki HONDA and Yoshio SHIOZAKI

Steelmaking slag is utilized for material of sand compaction pile method. The improved ground by steelmaking slag compaction pile has high strength, so steelmaking slag can reduce improved area in design of circular rupture. In this study, we evaluated whether steelmaking slag reduces improved area in a method for earthquake resistant design. Dynamic deformation characteristic and liquefaction strength of steelmaking slag were determined by laboratory test, and dynamic analysis of improved ground by steelmaking slag compaction pile was carried out. As a result of the analysis, horizontal displacement of gravity type quay wall improved by steelmaking slag compaction pile method is equal to the one improved by sand slag compaction pile method.