

技術論文

遠心力模型実験による水硬性スラグコンパクションパイル工法の設計法及びレベル2地震動における変形抑制効果の検証

Centrifuge Model Test on Design Method of Ground Improved by Hydraulic-Slag Compaction Pile Method and its Reduction Effect of Deformation Induced by Level-2 Seismic Motion

篠崎 晴彦*	土田 孝	一井 康二
Haruhiko SHINOZAKI	Takashi TSUCHIDA	Koji ICHII
森川 嘉之	高橋 英紀	大林 淳
Yoshiyuki MORIKAWA	Hidenori TAKAHASHI	Jun OHBAYASHI
木下 洋樹	平嶋 裕	小林 茂雄
Hiroki KINOSHITA	Yutaka HIRASHIMA	Shigeo KOBAYASHI

抄 録

新日鉄住金(株)は、鉄鋼スラグの水硬性を利用した水硬性スラグコンパクションパイル材料(エコガイアストーン(固結タイプ))を開発した。水硬性スラグコンパクションパイル工法による改良地盤は、高強度・高剛性を有するため、改良範囲の低減、地震動に対する変形抑制効果が期待できる。そこで、本工法により改良された基礎地盤の設計法、レベル2地震動に対する残留変形抑制効果について、遠心力模型実験により評価した。

Abstract

Hydraulic slag compaction pile material is developed by utilizing hydraulic property of iron & steel slag. The improved ground by hydraulic slag compaction pile has high strength and stiffness, so reduction of improvement area and that of deformation induced seismic motion is expected. Then, design method and its reduction effect of deformation induced by level-2 seismic motion are verified with centrifuge model test.

1. 緒 言

現在、我が国では、東日本大震災を契機に顕在化した岸壁や防波堤等の港湾施設の社会インフラストラクチャの脆弱性に対応すべく、防災、減災等に資する国土強靱化基本法案が策定され、港湾施設の耐震化の検討が盛んに行われ始めている。

一方、我が国の沿岸地域の海底地盤の多くは、軟弱な粘性土が堆積した地盤であり、港湾施設の耐震化を図るには多大な地盤改良コストがかかるため、そのコスト削減ニーズは高い。新日鉄住金(株)は鉄鋼スラグが有する水硬性に着目し、地盤改良コストの削減に有効なサンドコンパクションパイル材料(水硬性スラグコンパクションパイル、以下、水硬性スラグCP)を開発した。

本論文では、開発課題として、設計法(常時の安定計算法)の確立とレベル2地震時の変形抑制効果を検証するた

めに実施した遠心力模型実験の結果について紹介する。

2. 本 論

2.1 水硬性スラグ CP 工法の概要

2.1.1 水硬性スラグ CP 工法

本工法は、従来工法であるサンドコンパクションパイル工法(以下、SCP工法)の砂の代替材料に鉄鋼スラグを用いた工法である。製鋼スラグに高炉徐冷スラグまたは水砕スラグを質量比で15%~50%の範囲で混合して製造することで、一軸圧縮強さ $q_u=60\text{kN/m}^2$ 以上の固結性能を確保することができるため、設計に用いるせん断抵抗角 $\phi=42^\circ$ 以上となり、せん断剛性も向上する¹⁾。

これにより、図1に示すように、従来のSCP(砂 $\phi=35^\circ$)に比して地盤改良範囲を減らすことができ、建設コストを削減できることが期待される。

* 設備・保全技術センター 土木建築技術部 スラグ利用技術室 主幹 博士(工学) 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511

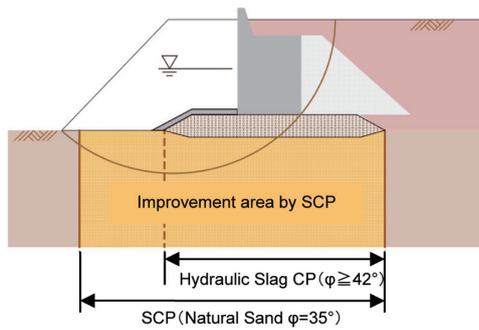


図1 水硬性スラグ CP の適用効果イメージ
Image of effect of hydraulic slag CP

2.1.2 従来工法比較と水硬性スラグ CP の開発課題

従来工法として代表的な地盤改良工法には、深層混合処理工法（以下、DM 工法）と SCP 工法がある。DM 工法は、原位置でセメント等の固化材と軟弱粘性土地盤を混合し強固な改良体を築造する工法であり、SCP 工法は、軟弱粘性土地盤に締め固めた砂杭を築造し、置換え改良を行う工法である。各工法の改良仕様（改良幅、改良率等）は、常時の静的外力に対する安定性を評価して設定する。また、レベル2地震動に対しては、先に設定した改良仕様での護岸の残留変形量の照査を行う。

特に、DM と SCP は構造、強度等の相違により常時の安定性に対する設計法が全く異なる。

DM 工法による改良体の一軸圧縮強度は 1500～2500 kN/m² と高強度なため、土でなく低強度のコンクリートに近い強度、変形、破壊特性を示す。そのため、地盤としてではなく、周辺の未改良地盤におけるコンクリート構造物の転倒、滑動などの剛体安定の照査及び、改良体自体の破壊に対する強度安全性の照査を行う。また改良体は、破壊に至ると急激な強度低下（脆性破壊）により、上部構造物は致命的な崩壊に至る危険性があることから、破壊に対して十分な安全性を確保している。

一方 SCP 工法による砂杭は、周辺の軟弱地盤との強度、破壊時（ピーク強度）のひずみ差が小さく、急激な強度低下がない（残留強度により粘りが存在）ことから原地盤と砂杭は複合地盤として一体的に挙動し、常時の外力に対してすべり破壊となる。水硬性スラグ CP は、DM と SCP の両方の強度成分（ $c-\phi$ ）特性を有しており、どちらの設計法を適用すべきか確立されていない。図1に示す効果を期待するためには、SCP 工法の設計法を適用することが必要である。

一方、2007年に改定された“港湾の施設の技術上の基準・同解説”では、耐震強化岸壁にレベル2地震動に対する残留変形照査が義務付けられ、レベル2地震動に対する重要性が高まっている。DM は強度や剛性が大きく、改良体の変形は小さく抑えることができる。それに対して、従来の天然砂による SCP 改良地盤の場合、条件にもよるが、変形

をある程度許容するために適用性に課題がある。水硬性スラグ CP では、砂杭よりも強度、剛性が大きいので、従来の砂を用いた SCP と比較して、変形抑制効果が期待される。

以上のことから、水硬性スラグ CP の開発課題は、以下に示す2つとした。

- (1) SCP 工法の設計法として、常時の安定計算法である円弧すべり計算法適用性確認のための破壊モードの確認
- (2) 強度、せん断剛性 UP によるレベル2地震時の砂杭に対する残留変形抑制効果の検証

この課題に対して、実スケールで SCP 杭及び地盤、構造物からなる全体系での評価が必要である。これに対して、評価可能な数値解析法が確立されていないことから、模型レベルで数十倍もの実スケールの現象が再現可能でかつ実績のある遠心力模型実験を用いて評価した。

2.2 静的遠心力模型実験による常時破壊モード検証³⁻⁵⁾

2.2.1 実験方法

遠心力模型実験装置は(独)港湾空港技術研究所の Mark II²⁾を用いた。図2に実験模型の概要を示す。模型容器は鋼製で、内寸奥行き 20cm、幅 120cm、高さ 60cm である。前面はガラスでできており、実験中の模型地盤の変形挙動を遠心加速度場でも観察できるようにしている。模型容器内で作成した土層の支持層には豊浦珪砂を用いており、その相対密度は $D_r=86\sim 91\%$ であった。粘土地盤は、カオリンを使用し、初期含水比 120% のスラリー状にして流し込み、10kN/m² の載荷圧にて圧密、50g の重力場で自重圧密を行った。

SCP 模型杭は、1/50 スケールで実物の円柱を 70% 以上の高置換率に配置することが精度上困難であったため、通常円形断面杭による高置換率改良における護岸法線直角方向の変形挙動と等価な矩形断面で代用した。模型杭の概要を写真1に示す。模型杭は、鋼製型枠に 4.75mm 以下で粒度調整した製鋼スラグと高炉水砕スラグを 8:2 で混合した材料を所定の密度で充填し、約1週間の水中養生にて固結させた後、凍結させた。凍結させた改良体は脱枠して、50g 場で圧密、1g 場で十分膨張させた粘土地盤を鋼製枠の大きさにあわせて乱さないようくり抜いた孔に押し込んだ。

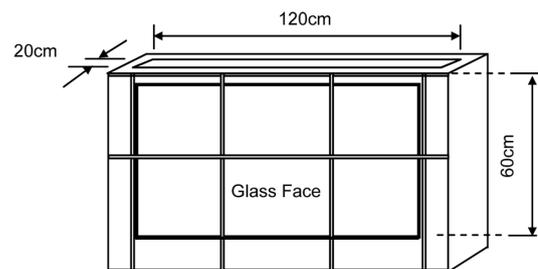


図2 模型容器
Model container

次に模型杭を模型地盤に打設後、改良域及び埋立側粘土地盤表面に厚さ2cmのサンドマットを作成した。サンドマットには豊浦砂を空中落下法によって作製し、その相対密度は74.6%であった。サンドマット敷設後に模型ケーソンを設置した。模型ケーソンはアクリル製で、幅14cm、高さ18cm、奥行き19.5cmで、その内部に砂などの錘を入れることで、重量を自由に変えることができる。模型ケーソンの密度は1.136g/cm³で、接地圧は水位を考慮して重力場(1g)で1.24kPa、50g場で62.04kPaとなる。ケーソンは、改良杭を模型地盤に設置した後、再度模型全体を遠心力(50g場)で設置した。

ケーソン背面の裏込め部は碎石を用いて作製した。碎石の粒度は、4.75mm~9.5mmで、裏込め部の寸法は、下端幅10cm、天端幅4cm、高さ12cmとした。裏込め石背面の埋立部は鉛弾を用いて作製し、乾燥密度 $\rho_d=6.45\text{g/cm}^3$ で、埋立部の高さは12cmとした。図3に模型地盤の概要(前面)を、図4に改良地盤水平断面図をそれぞれ示す。改良地盤の置換率は33%とした。

表1に静的遠心力模型実験に用いた水硬性スラグCPの物性を示す。尚、スラグの強度は、模型作製から試験まで、凍結・解凍の工程を経るため、それと同じ工程にて養生後、強度を測定した。

模型への载荷は、遠心加速度により実施した。まず、遠心加速度を6gまで増加させ、計測及び写真撮影を行い、その後遠心加速度を3gピッチで段階的に増加させ、各段



写真1 疑似壁式SCP模型の外観
Pseudo wall type SCP model

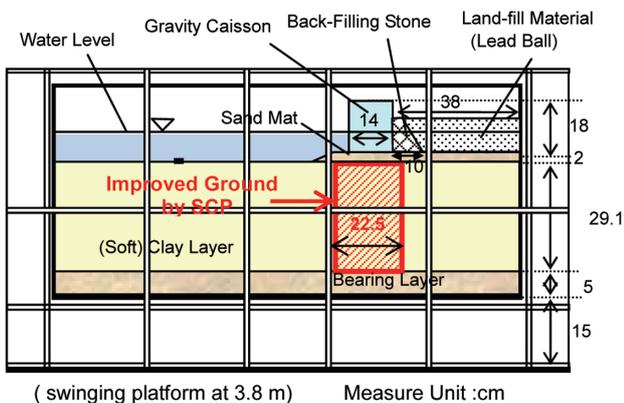


図3 実験模型概要(前面)
Outline of testing model (front face)

階で計測及び写真撮影を行い、大きな地盤変位が生じたことを確認したら終了する。尚、NGの遠心力模型実験における変位は実スケールで模型のN倍、圧力は模型の1倍となる。

2.2.2 実験結果

図5に、ケーソンの水平変位と埋立圧力の関係を示す。尚、水平変位の測定点の代表点をケーソン海側の面直下の改良地盤内の点Bを選んだ。遠心加速度を増加する前の1g場での値を0とし、遠心加速度の大きさによらず模型寸法を50倍して示してある。図5より、埋立荷重が127kPa以上で変位が急増しており、地盤破壊が発生したものと考えられる。

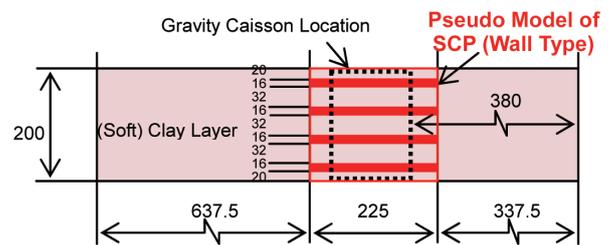


図4 模型地盤の水平断面図(模型スケール)
Horizontal section of model ground (model scale)

表1 遠心力模型実験に用いた地盤材料の特性
Property of slag CP

Property item	Slag SCP
Max particle size (mm)	4.75
D ₅₀ (mm)	0.58
U _c	11
Paricle density (g/cm ³)	3.19
Void ratio e	0.58
Un-confined compression	137.2
Cohesion (kN/m ²)	91.8
Internal friction angle ϕ_d	39.1

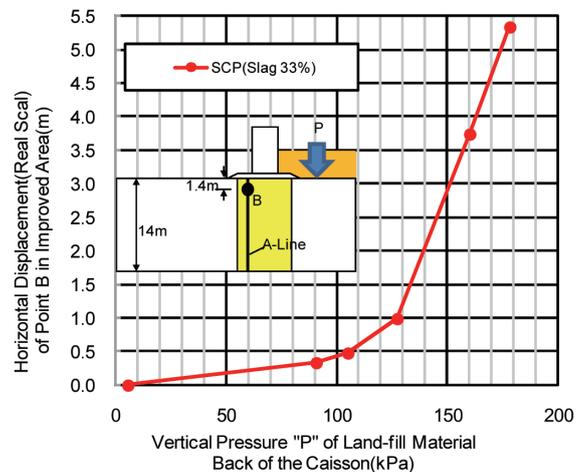


図5 SCP改良地盤中のB点の水平変位(実スケール)
Horizontal displacement of point B in improved ground by SCP (real scale)



写真2 遠心力模型実験後の地盤の破壊、変形状態
State of failure and deformation of ground after centrifuge model test

写真2は、実験終了後に模型を解体して表面のカオリン粘土を除去後の模型杭の状況である。写真より、改良領域には全体的に海側へ倒れ込むような変形が見られ、改良領域下部（改良領域下端から模型スケールで約5cm付近）ではすべり破壊が生じていることが分かる。また、改良領域背後の粘土地盤には円弧すべりのようなすべり面が見られる。改良領域の前面の粘土地盤には海側上方へかなり大きな変位が生じているが、明確なすべり面等の確認まではできなかった。

遠心模型実験において、容器ガラス面側の粘土地盤に設置したターゲットを写真撮影し、それを画像解析することで、遠心加速度及び埋立圧力に対する地盤変位も測定した。図6に遠心加速度の増加による破壊実験における地盤変位の結果を示す。以下に示す各変位量は、遠心加速度の大きさによらず、模型寸法を50倍して示している。

図6(a)は遠心加速度21g・埋立圧力127kPa、図6(b)は遠心加速度24g・埋立圧力160kPaの場合をそれぞれ示している。

図6(a)では、改良領域の下端から地表面に近づくほど海側への変位が大きくなっている。また、改良領域前面の粘土地盤では地表面に近づくほど海側上方への変位が見られ、改良領域背面の粘土地盤には海側への変位が見られる。(b)の遠心加速度24g・埋立圧力160kPaを見ると、改良領域の下部を通るすべり破壊が生じていることが明確に分かる。

図7にケーソン天端に設置した鉛直変位計から求めた沈下量と埋立圧力の関係を示す。ケーソンの沈下量は、遠心加速度の大きさによらず、模型寸法を50倍して示してある。図より、ケーソンの沈下量は、遠心加速度の増加による埋立圧力の増加に伴い、単調に増加し、埋立圧力が143kPa（遠心加速度23g）になると急増していることが分かる。このことから、埋立圧力が143kPaで地盤が破壊したと考えられる。

以上より、水硬性スラグCPにより改良された地盤の破壊挙動は、高置換率改良を模擬した壁式の模型を用いた遠心力模型実験により、従来の天然砂を用いたSCP改良地盤と同様なすべり破壊であることが確認できた。尚、港湾施設の現行設計法に従って、修正フェレニウス法による円弧すべり計算を実施した結果、ほぼ実験結果を評価できる

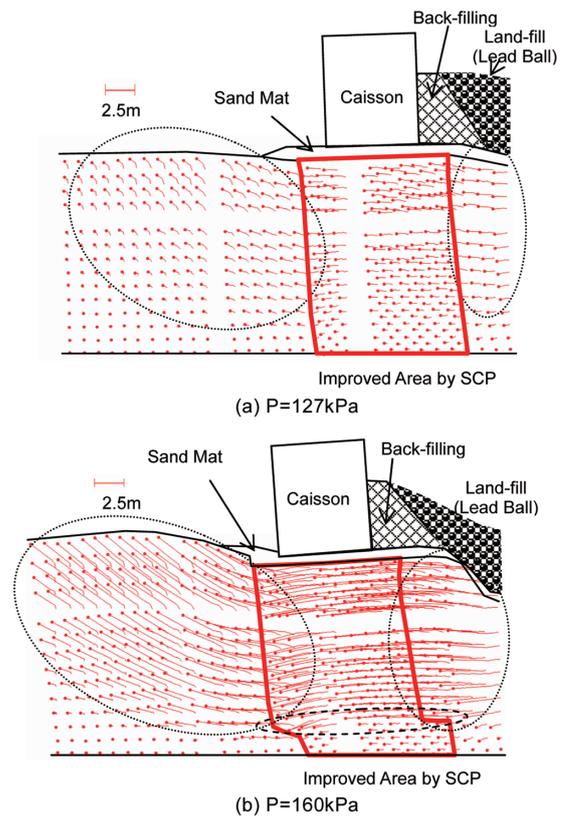


図6 SCP改良地盤の変形状態及び変位ベクトル（実スケール）
State of deformation and deformation vector of ground improved by SCP (real scale)

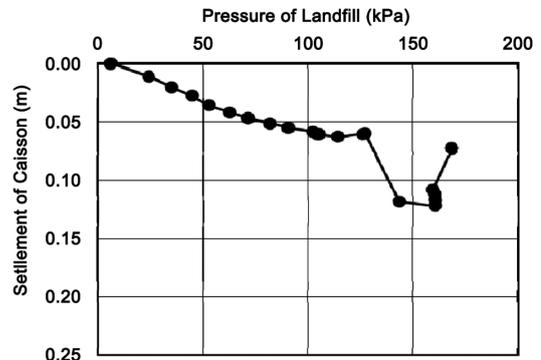


図7 ケーソンの鉛直変位（実スケール）
Vertical displacement of caisson (real scale)

ことを確認した。

2.3 動的遠心力模型実験によるレベル2地震時の残留変形抑制効果検証

2.3.1 実験方法

実験に用いた模型地盤の概要を図8に示す。模型地盤としては、支持砂層の上に正規圧密の粘土地盤（厚さ160mm）を作製した。粘土地盤の作成及び模型杭の打設は、静的遠心力模型実験の場合と同様である。表2に実験ケース、表3に改良杭の物性をそれぞれ示す。改良地盤のSCP杭は図9に示す通り、鉄鋼スラグ及び豊浦砂を用いた壁式ブロック（長さ180mm、厚さ28mm、高さ160mm）

とし、どちらも置換率は58%とした。模型ケーソンは、高さ130mm、幅100mm、奥行き195mmの亚克力製の箱型

(5.125kg)で、その内部に砂を入れて密度を2.02g/cm³にした。実験時の水位を考慮すると、遠心力50g場におけるケーソンの接地圧は約85kPaとなる。

入力する地震動の加速度時刻歴を図10に示す。実験では、重力場(50g)にて、模型下に設置した加振装置により地震波の振幅倍率(振幅倍率1:図9に示す加速度)を徐々に大きくするステップ加振(0.1倍, 0.7倍, 1.0倍)を行い、模型地盤の変位、応答加速度、水圧などを計測した。

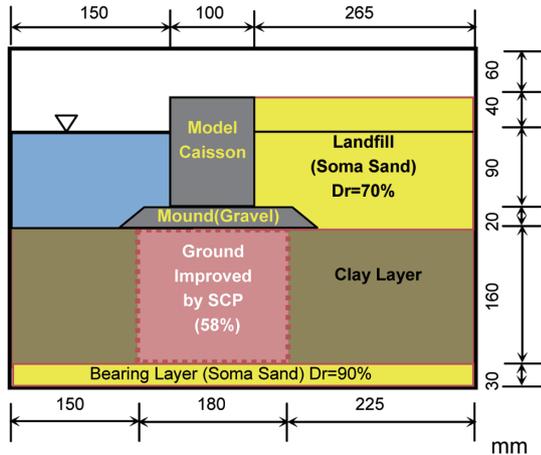


図8 遠心力模型実験のモデル地盤(模型スケール)
Model ground used for dynamic centrifuge model test (model scale)

表2 動的遠心力模型実験ケース
Test case of dynamic centrifuge model test

Case No.	Materials of model SCP	Shape of SCP	Improvement ratio
1	Toyoura sand	Wall type	58%
2	Slag	Wall type	58%

表3 改良杭の物性
Physical property of SCP model

Physical property	Slag	Natural sand
Particle density G_s (g/cm ³)	3.05	2.66
Dry density ρ_d (g/cm ³)	1.94	1.54
Internal friction angle ϕ (°)	45.1	37.0
Cohesion (kN/m ²)	68.6	-
Unconfined compression strength (kN/m ²)	225.0	-

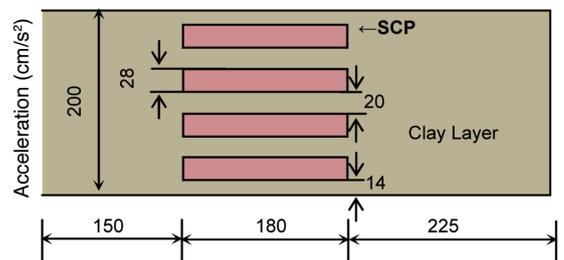


図9 モデル地盤の水平断面(模型スケール)
Horizontal cross section of model ground (model scale)

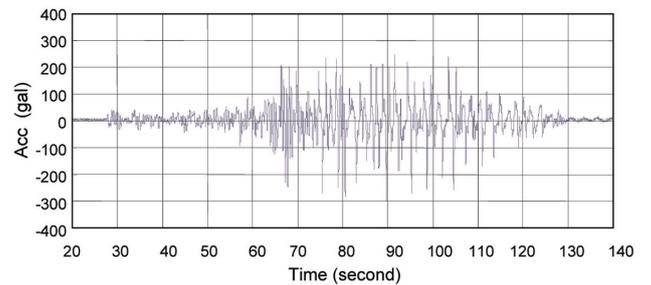
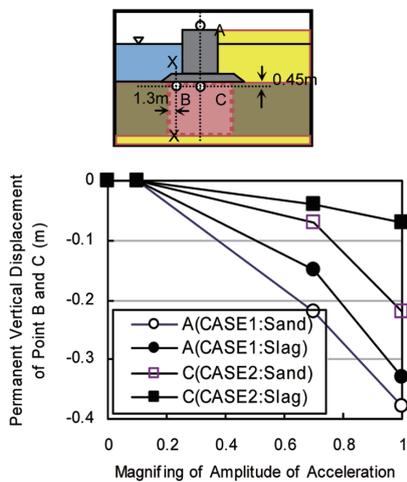
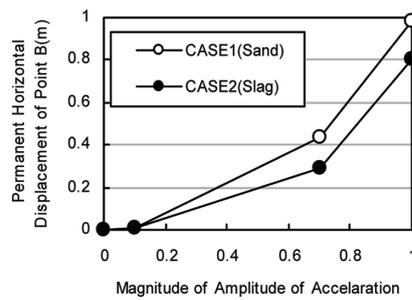


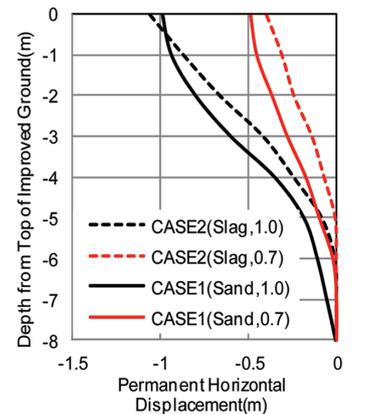
図10 入力地震動の時刻歴加速度
Time history acceleration of input seismic motion



(a) Residual Vertical Displacement of Point B and C



(b) Residual Horizontal Displacement of Point B



(c) Residual Horizontal Displacement X-X

図11 改良地盤の残留変位
Residual displacement of improved ground

改良部海端から実スケールで1.3mのB点（深さはC点と同じ）の残留水平変位量、図11(c)は、B点を通る鉛直線上の各点における残留水平変位量を示したものである。図より、CASE 2（スラグ）は、CASE 1（砂）に対して変形抑制効果がある。

3. 結 言

水硬性スラグCP工法による改良地盤の常時の破壊モード及び残留変形抑制効果について、遠心力模型実験により検証した結果、以下の知見が得られた。

- 水硬性スラグCP工法による改良地盤の常時の安定性に関しては、従来の天然砂を用いたSCP改良地盤と同様なすべり破壊であり、その破壊挙動は円弧すべり計算法により評価できる。また、従来の砂杭よりもせん断強度が大きいため、必要改良幅の低減が期待できる。
- 固結特性を有する水硬性スラグCP改良地盤の振動模型実験の結果、従来の砂杭改良地盤に対して残留変形抑制効果がある。

これらの成果により、本工法は、(一財)沿岸技術研究センターの港湾関連民間技術の確認審査評価事業にて評価証(第10001号)を取得することができた。

最後に、本工法は、現在取り組まれている国土強靱化を初めとする港湾施設の建設において、建設コストの縮減、

耐震性能の向上に有効であり、今後の適用の広がりを期待している。

謝 辞

本研究は、広島大学、港湾空港技術研究所、(株)不動テトラと新日鐵住金の共同研究により得られた成果である。ここに関係各位に感謝の意を表します。

参照文献

- 1) (一財)沿岸技術研究センター:港湾関連民間技術の確認審査・評価報告書. 第10001号, 2010
- 2) 北詰昌樹:新遠心力模型実験装置の開発と研究への応用. 港湾技術研究所資料. No.812, 1995, p.35
- 3) 高橋英紀, 森川嘉之, 篠崎晴彦, 木下洋樹, 丸山憲治:固結特性を有する鉄鋼スラグを用いたSCP改良地盤の埋立載荷荷重に対する安定性. 地盤工学ジャーナル. 6(1), 81-95 (2011)
- 4) 木下洋樹, 一井康二, 森川嘉之, 高橋英紀, 篠崎晴彦, 高橋裕徳:鉄鋼スラグを用いたSCP改良による重力式ケーソン構造物の基礎地盤の地震時変形特性とその評価. 地盤工学ジャーナル. 7(1), 323-337 (2012)
- 5) 木下洋樹:鉄鋼スラグを用いたSCP改良地盤の地震時変形特性と評価に関する研究. 広島大学学位論文. 2011



篠崎晴彦 Haruhiko SHINOZAKI
設備・保全技術センター 土木建築技術部
スラグ利用技術室 主幹 博士(工学)
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



大林 淳 Jun OHBAYASHI
(株)不動テトラ 建設本部 地盤技術部長
博士(工学)



土田 孝 Takashi TSUCHIDA
広島大学 大学院工学研究科
社会環境システム専攻 教授 博士(工学)



木下洋樹 Hiroki KINOSHITA
(株)不動テトラ 地盤事業本部 技術部
第二研究室(中国) グループリーダー
博士(工学)



一井康二 Koji ICHII
広島大学 大学院工学研究科
社会環境システム専攻 准教授 博士(工学)



平嶋 裕 Yutaka HIRASHIMA
スラグ・セメント事業推進部
スラグ営業推進室 主幹



森川嘉之 Yoshiyuki MORIKAWA
(独)港湾空港技術研究所 地盤・構造部
地盤研究領域 地盤改良研究チーム
リーダー 博士(工学)



小林茂雄 Shigeo KOBAYASHI
設備・保全技術センター 土木建築技術部長
博士(工学)



高橋英紀 Hidenori TAKAHASHI
(独)港湾空港技術研究所 地盤・構造部
地盤研究領域 動土質研究チーム
主任研究官 博士(工学)