

高置換 SCP 改良地盤の地震時変形評価における改良幅の影響

Influence of Improvement Width on Seismic Deformation Evaluation of
Improved Ground by Sand Compaction Pile Method with High Replacement Ratio

木下洋樹 Hiroki KINOSHITA ((株)不動テトラ 地盤事業本部 技術部)
一井康二 Koji ICHII (広島大学 大学院工学研究院)
高橋裕徳 Yasunori Takahashi (広島大学 大学院工学研究科)

沿岸部に堆積する軟弱粘性土地盤の安定対策として、サンドコンパクションパイル (SCP) 工法が広く用いられているが、この SCP 改良部には地震時の安定性も求められている。本研究では、ケーソン式の重力式構造物で基礎地盤を SCP により改良されている断面において、改良幅を数ケースで変動させて地震応答解析を実施し、SCP の改良効果について分析した。その結果、改良部における初期せん断応力比と地震後の最大せん断ひずみがばらつきを持ちながらも曲線状に分布し、その曲線は SCP の材料および地震動特性に応じた傾向を持つことがわかった。そして、改良幅により異なる値が生じる初期せん断応力比に応じた地震後の最大せん断ひずみが発生していることがわかった。

キーワード：サンドコンパクションパイル、数値解析、地震時変形 (IGC : E-02, E-08)

1. はじめに

沿岸部に堆積する軟弱な粘性土地盤上に港湾構造物を構築する場合において、この軟弱地盤対策として、サンドコンパクションパイル (SCP) 工法が代表的な工法として広く用いられている。この工法は、地盤中に締固めた砂杭を強制的に打設し、砂杭自身によるせん断強さとドレーン効果による周辺地盤の圧密促進により安定性向上を図ることができ、重力式の岸壁や護岸およびその背面の埋立土に対する安定対策として多くの実績を持つ。

また、特に兵庫県南部地震 (1995 年) 以降、構造物に対する耐震性の向上が求められているとともに、港湾施設等に対する性能設計化¹⁾により、地震時の変形照査の必要性が高まっている。一般的に、SCP 工法による改良地盤を含む構造物の実検討では、永続状態での性能照査 (円弧すべり計算、圧密沈下計算等) を行い、これにより求められた改良幅、改良深度、改良率といった改良仕様を基本として、構造物に求められる要求性能に応じて地震時の変形照査を行うことが多い。しかしながら、構造物の要求性能あるいは想定する地震動によっては、地震時の照査により構造の決定が左右されるケースも考えられる。このような観点より、SCP の中詰め材料の違い等を踏まえて、種々の改良断面での SCP 改良部の変形の程度について調べることは、SCP の適切な改良仕様を検討する上で重要であると考えられる。

そこで本研究では、ケーソン式の重力式構造物で基礎地盤を SCP により改良されている断面に対して、地震時に

おける改良効果について検証を行った。具体的には、SCP による改良幅をいくつかのケースで変動させた断面にて地震応答解析を実施し、初期の応力状態に着目して、改良エリアにおいて発生するせん断ひずみおよび変位量について分析した。SCP の材料としては一般的に用いられる砂と、砂の代替材として開発されている鉄鋼スラグのケースとし、さらに地震動の違いに対するせん断ひずみの発生の違いについても調べるために、特性の異なる 2 種類の地震動を用い、異なる SCP 材料および入力地震動の条件に対して、せん断ひずみおよび変位量の比較を行った。

なお、地震応答解析としては、港湾構造物の地震時における有効応力解析プログラムの代表的な手法の一つであり、SCP 改良地盤を含む重力式岸壁の解析検証実績²⁾を有している FLIP³⁾を用いることとした。

2. 検討条件

2.1 解析モデル

解析モデルは、「港湾構造物設計事例集(平成 19 年 改訂版)」に示されている重力式構造物の断面例⁴⁾を用いた。解析モデルを図-1 に示す。SCP 改良エリア上に基礎捨石および重力式のケーソンが配置され、その背面は裏込め石および埋立土により形成される断面である。なお埋立層は液化化層となっている。図のモデルにおいて SCP 改良エリアは置換率を 70%とし、ケーソン法線部を基準として前面

側（海側）に 6.0m～19.5m の範囲（B/L=1.0～1.5 程度）で 4 パターンで改良幅を変動させる。置換率 70% の解析モデル上での表現方法としては、参考文献 2) を参照し、本解析モデルでは 2 次元モデルにて単位奥行き幅 1.0 であるのに対し、改良エリアについては単位奥行き幅を 0.7 とすることで表現した。解析モデルに対するケースとしては表-1 のとおりまとめられる。

2.2 解析パラメータ

砂を用いた高置換 SCP 改良地盤では、その改良部の評価として等価 N 値で 20 相当になることが示されている⁵⁾。砂による改良地盤のパラメータとしてはこれを用い、さらに改良地盤の $F_c=5\%$ と仮定して、FLIP 研究会において示されている簡易パラメータ設定法⁶⁾⁷⁾を用いて設定した。なお、一般的に $F_c \leq 5\%$ の材料を用いることが推奨されている⁸⁾ことを踏まえて、大きめの値として $F_c=5\%$ とした。

鉄鋼スラグは、砂よりも高いせん断剛性ならびにせん断強度を有する材料であり、その地震時の変形挙動に関し実験的検討と解析的検討が行われている⁹⁾¹⁰⁾。本研究ではこ

の参考文献 10)において検討・設定されたパラメータを用いた。表-2 に改良エリアのパラメータ一覧を示す。砂および鉄鋼スラグの両材料ともに、液状化パラメータを設定しているが、これは締固められた粒状材料の特性である正のダイレイタンス特性を評価することを目的としたものである。

また、SCP 改良エリア以外のパラメータについては参考文献 4)を参照し設定している。

2.3 入力地震動

入力地震動は、衝撃型、長時間継続型の 2 種類の地震動を用いた。衝撃型の地震動としては、神戸港ポートアイランドの鉛直アレー地震観測網による 1995 年兵庫県南部地震の際の GL-32m での観測波形（NS 成分）を用いた。長時間継続型の地震動としては、東南海・南海地震での想定波を用いた。それぞれの加速度時刻歴を図-2、図-3 に示す。衝撃型地震動は最大加速度が 544Gal で主要動の継続時間は約 10 秒、長時間継続型は最大加速度は 108Gal であるが主要動の継続時間は約 150 秒となっている。

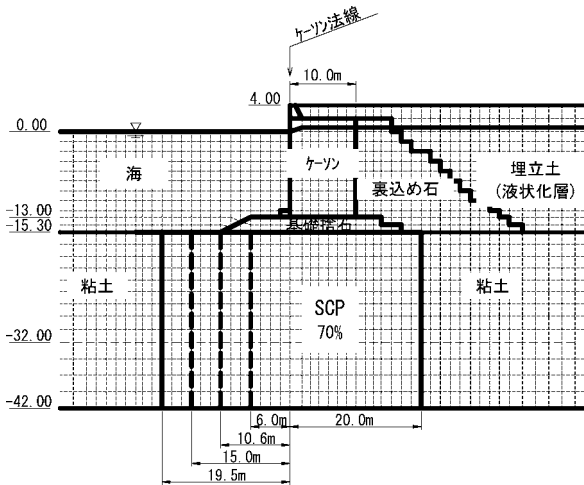


図-1 解析モデル図

表-2 SCP 改良エリアのパラメータ

改良部の材料		砂	鉄鋼スラグ'
湿润密度	ρ_s (g/cm ³)	2.07	2.34
間隙率	n	0.43	0.43
ポアソン比	v	0.33	0.33
初期せん断剛性	G_{m0} (kN/m ²)	127400	171900
初期体積弾性係数	K_{m0} (kN/m ²)	332200	448200
有効拘束圧	σ_{m0}' (kN/m ²)	98	98
最大減衰定数	h_{max}	0.240	0.129
せん断抵抗角	ϕ_r (°)	40.2	43.5
変相角	ϕ_p (°)	28.0	28.0
液状化パラメータ	s1	0.005	0.005
	w1	6.20	30.00
	p1	0.50	0.50
	p2	0.59	0.50
	c1	4.78	3.69

表-1 解析モデルのケース

ケース	改良材	法線前面側改良幅
Sand-01	砂	6.0m
Sand-02		10.6m
Sand-03		15.0m
Sand-04		19.5m
Slag-01	鉄鋼スラグ'	6.0m
Slag-02		10.6m
Slag-03		15.0m
Slag-04		19.5m

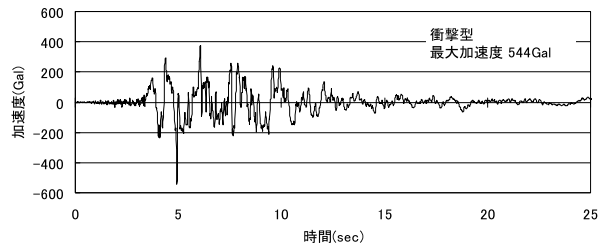


図-2 入力地震動（衝撃型）

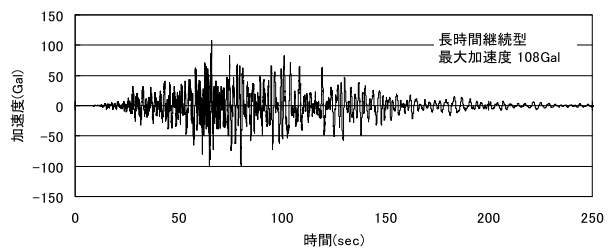


図-3 入力地震動（長時間継続型）

3. 解析結果と考察

3.1 初期応力状態とせん断ひずみの関係

図-4、図-5に示すのは、改良エリアの各要素について、自重解析終了段階での初期せん断応力比 τ_{max}/σ'_m に対して、地震終了段階での最大せん断ひずみ γ_{max} をプロットしたものである。なお、最大せん断ひずみ γ_{max} と最大せん断応力 τ_{max} は下式により算定される。

$$\gamma_{max} = \sqrt{\gamma_{xy}^2 + (\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2} \quad (1)$$

$$\tau_{max} = \sqrt{\tau_{xy}^2 + (\sigma_x - \sigma_y)^2} / 4 \quad (2)$$

初期せん断応力比 τ_{max}/σ'_m は、改良幅の増加とともに低減する傾向となっている。より明瞭な比較のために、図-6に、材料を砂とした場合であるケース Sand-02 と Sand-04 における初期せん断応力比の分布図を示す。図より、改良幅が大きくなると τ_{max}/σ'_m が全般的に小さくなっていることがあきらかである。すなわち、改良幅の増加に伴い応力

状態がせん断破壊線より遠ざかる傾向となる。

図-4の各改良幅毎の τ_{max}/σ'_m と γ_{max} の関係に着目すると、 τ_{max}/σ'_m の増加に伴い γ_{max} の増加幅は徐々に大きくなっており、その分布はばらつきを持ちながらも曲線状に分布する傾向が確認できる。この傾向は、SCP の材料を砂あるいは鉄鋼スラグとした場合ともに同様であるが、それぞれの材料に対して異なる曲線を持っており、砂よりも鉄鋼スラグの方が下側で曲線を描いている。また、改良幅の増加とともに、 τ_{max}/σ'_m および γ_{max} はともに減少していく傾向となっている。

地震動の相違による傾向としては、図-4に示す衝撃型地震動の結果と図-5に示す長時間継続型地震動の結果ともに τ_{max}/σ'_m と γ_{max} が曲線状に分布する傾向で同様であるが、2つの地震動で比較すると、同じ材料の場合、図-5に示す長時間継続型地震動の曲線の方が下にくることとなり曲線の位置は異なっている。つまり地震動の特性に応じた曲線状の分布となっていることがわかる。

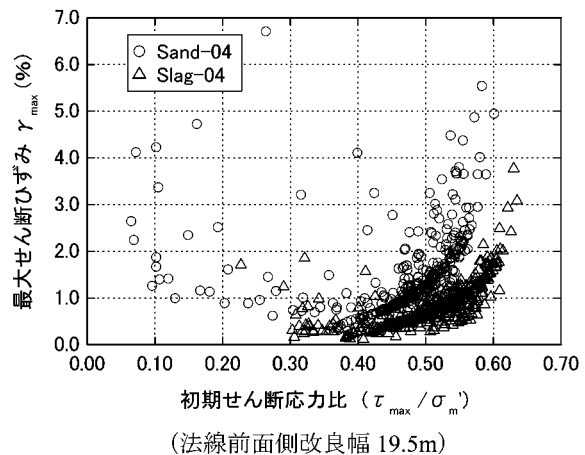
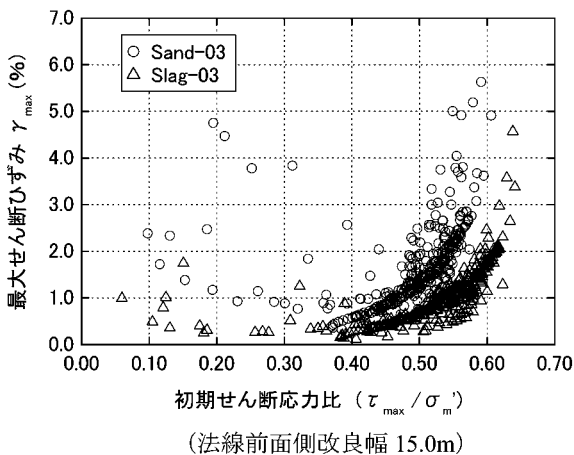
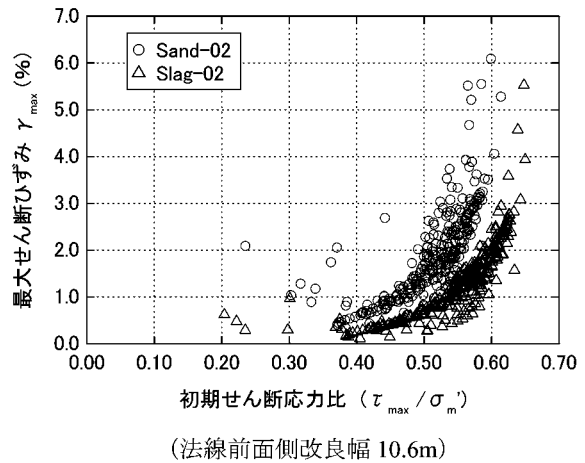
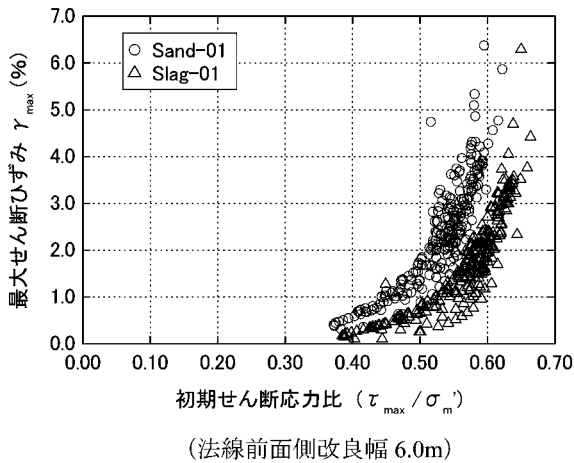


図-4 初期せん断応力比に対する最大せん断ひずみの分布 (衝撃型地震動)

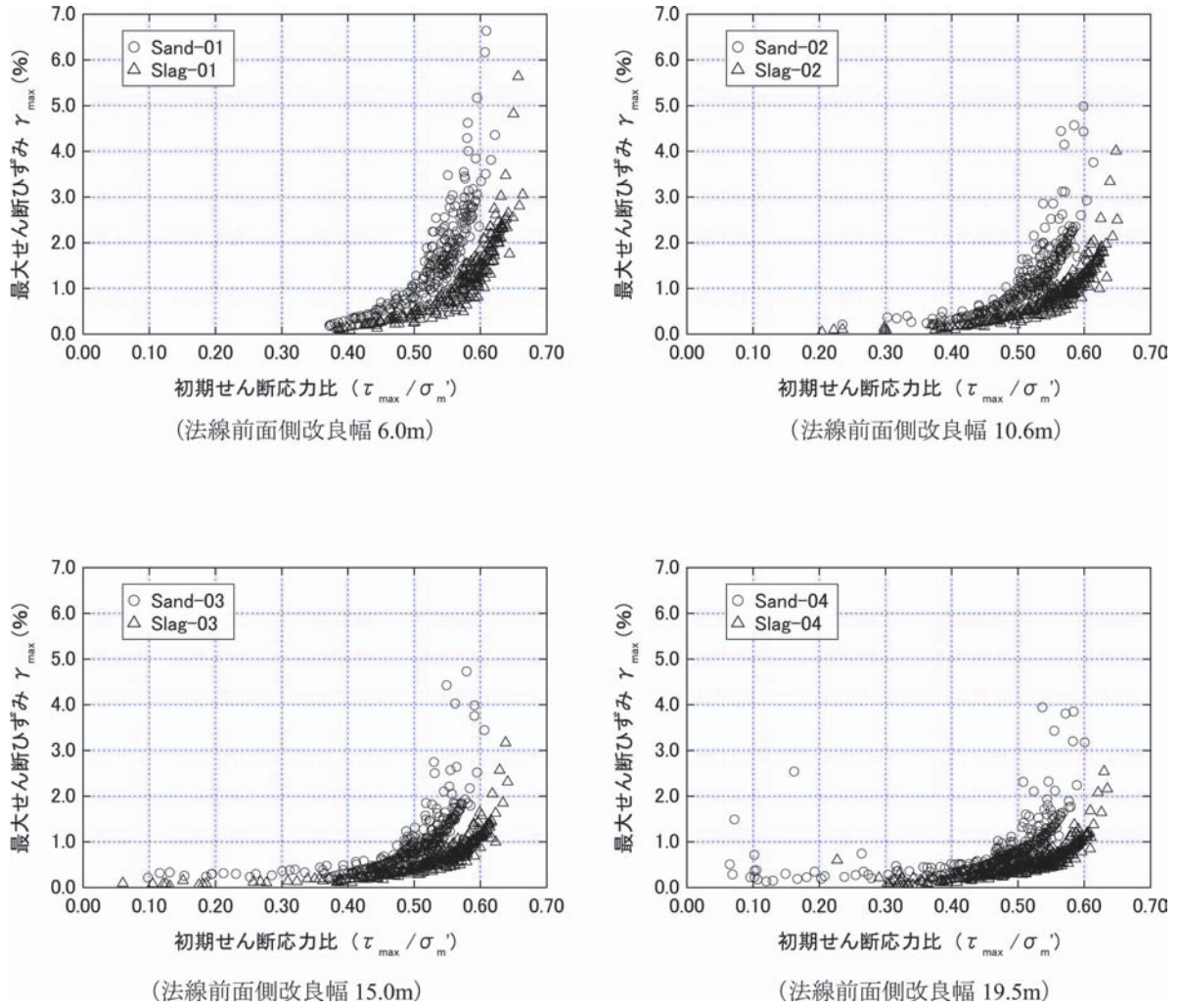


図-5 初期せん断応力比に対する最大せん断ひずみの分布
(長時間継続型地震動)

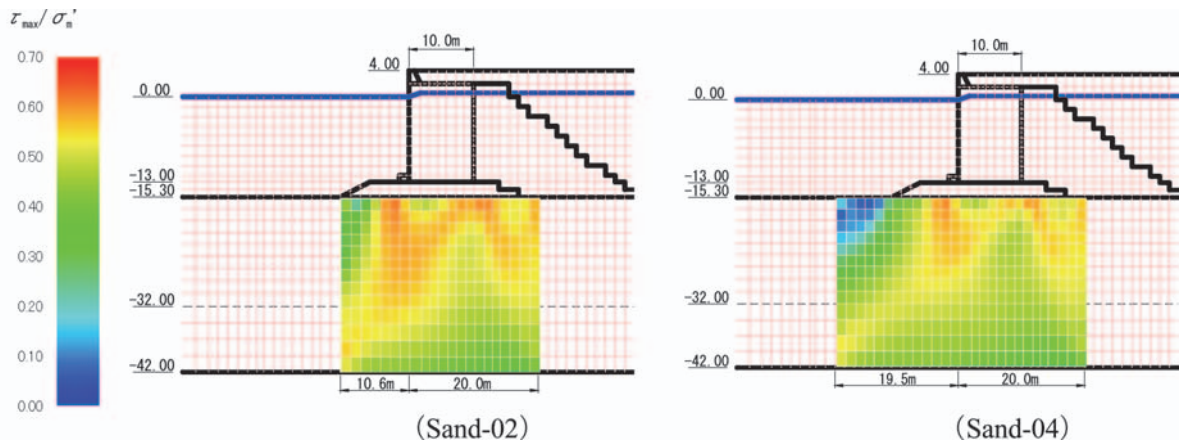


図-6 改良エリアにおける初期せん断応力比の分布

次に、図-7 に示すように、ケーソンの変形量の評価において最も影響が大きいと思われる、ケーソン法線ライン前後の鉛直方向要素（なお、抽出幅は図-6 において特徴が共通する 4 要素）の τ_{\max}/σ'_m と γ_{\max} に関して同様の整理を行ったものを図-8、図-9 に示す。図からわかるように τ_{\max}/σ'_m と γ_{\max} の分布が、ばらつきを持ちながら曲線状に分布している。さらに、これらの改良幅の異なるケースをまとめて 1 つのグラフ上にプロットしたものを図-10、図-11

に示す。それぞれの図において、改良幅の違いに関わらず、 τ_{\max}/σ'_m と γ_{\max} の関係がほぼ同じ曲線に分布しており、SCP の材料と地震動が同じ条件の場合、改良幅の相違にかかわらずある特定の関係が存在することがわかる。すなわち、SCP の材料および地震動特性に応じた τ_{\max}/σ'_m と γ_{\max} の関係がある。そして、改良幅により異なる値が生じる初期（地震前）の τ_{\max}/σ'_m に応じた地震によるひずみ γ_{\max} が発生していることがわかった。

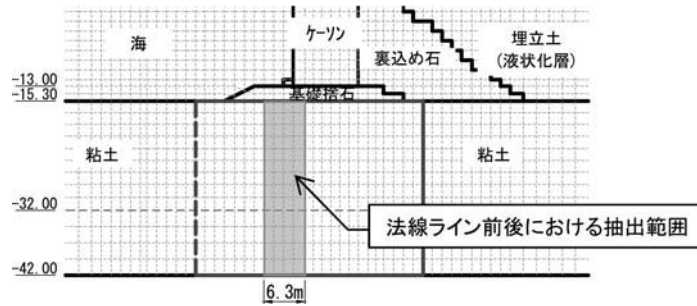


図-7 ケーソン法線ライン前後の抽出範囲

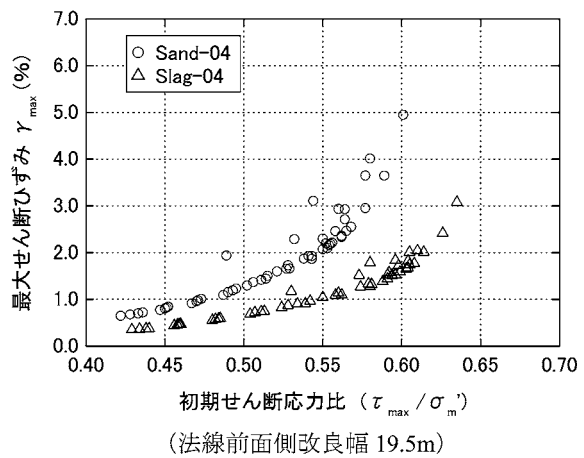
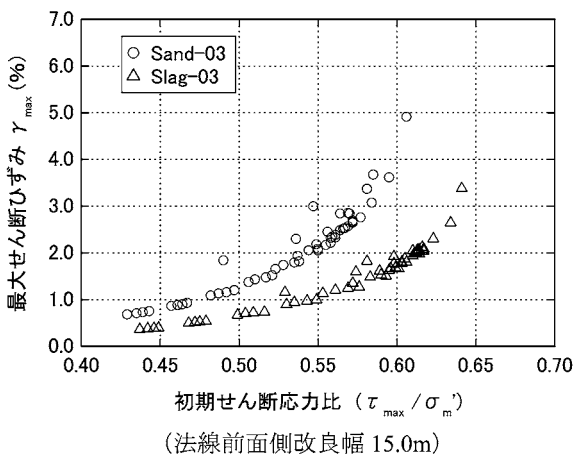
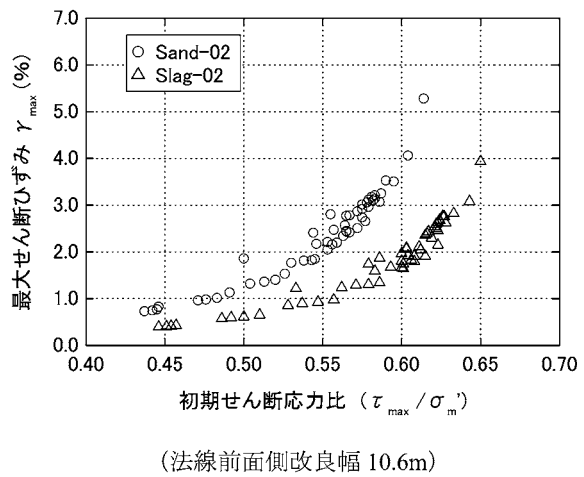
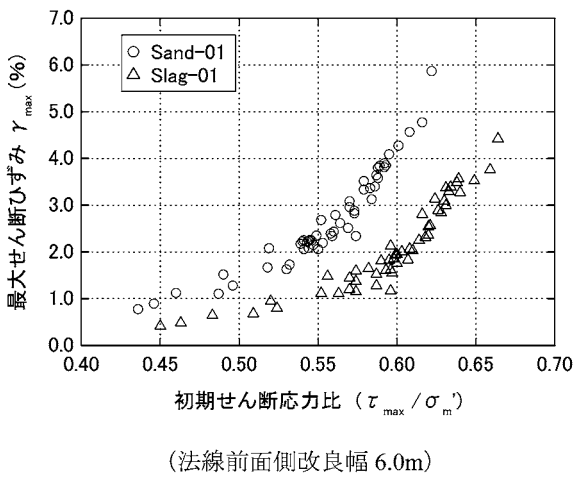


図-8 初期せん断応力比に対する最大せん断ひずみの分布
(衝撃型地震動)

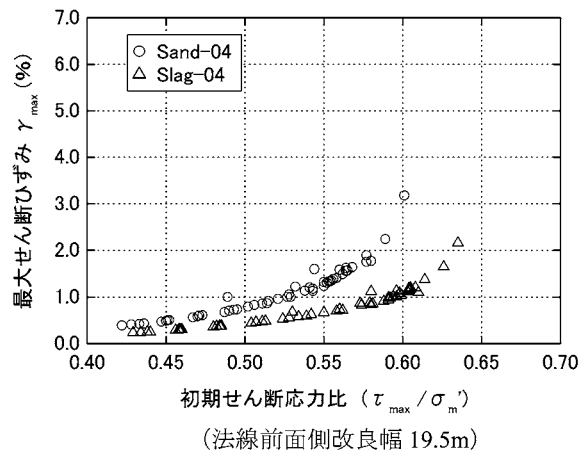
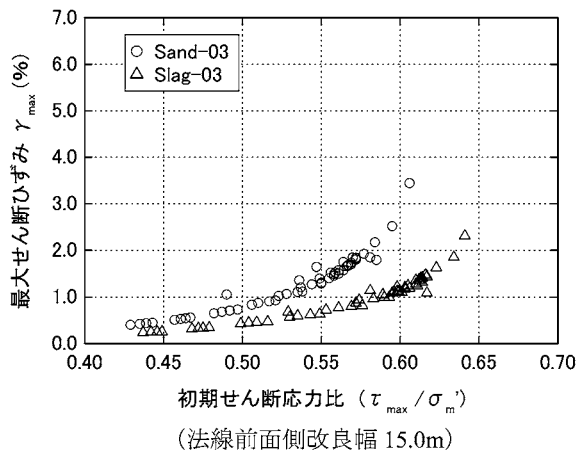
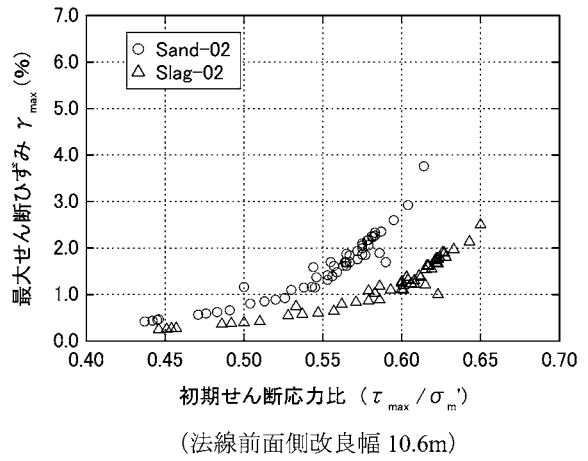
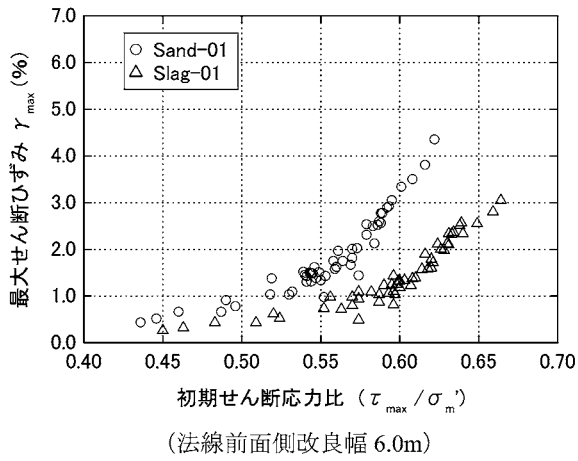


図-9 初期せん断応力比に対する最大せん断ひずみの分布
(長時間継続型地震動)

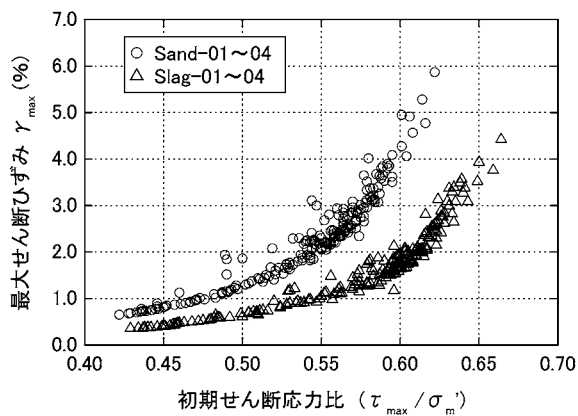


図-10 初期せん断応力比に対する最大せん断ひずみの分布 (衝撃型地震動)
(法線前面側改良幅 6.0~19.5m)

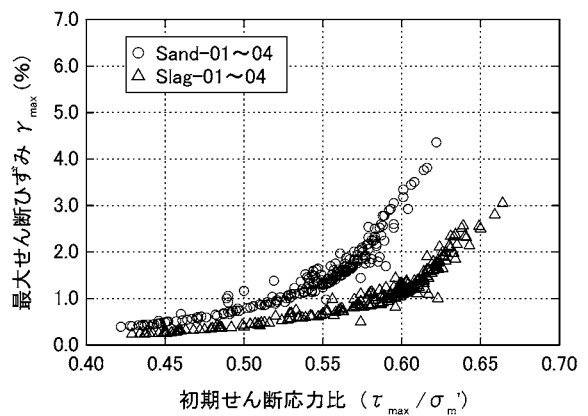


図-11 初期せん断応力比に対する最大せん断ひずみの分布 (長時間継続型地震動)
(法線前面側改良幅 6.0~19.5m)

3.2 改良エリアの変形量

図-12に示すのは、各改良幅に対するケーソン法線部の改良天端での水平方向変位の比較結果である。砂および鉄鋼スラグのどちらのケースにおいても、改良幅の増加とともに水平変位量が低減している。また、砂と鉄鋼スラグの比較では、砂と比較してせん断剛性・せん断強度がともに大きい鉄鋼スラグの方が変位量が抑えられる傾向となっ

ており、この傾向は既往の実験的検討結果⁹⁾と同様である。

図-13に示すのは、ケース Sand-02 の衝撃型地震動によるメッシュ変形図である。図に示すとおり改良エリアにおける変形は、ケーソンおよび背面埋立土からの影響により海側にせん断変形が卓越している状況となっていることがうかがえる。このような変形モードは、他の解析ケースでも同様であった。改良エリアの変形モードの状況より、

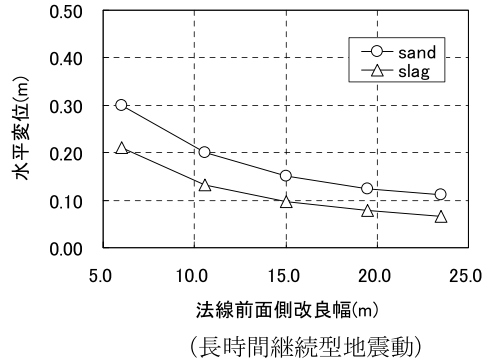
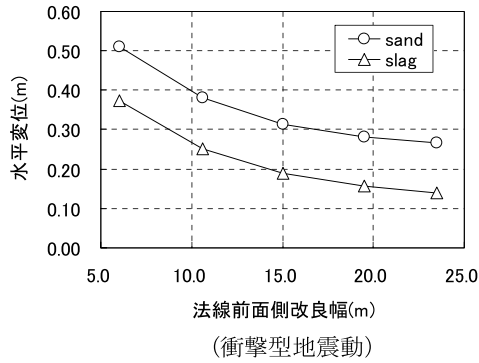


図-12 改良天端（法線ライン）の水平方向変位

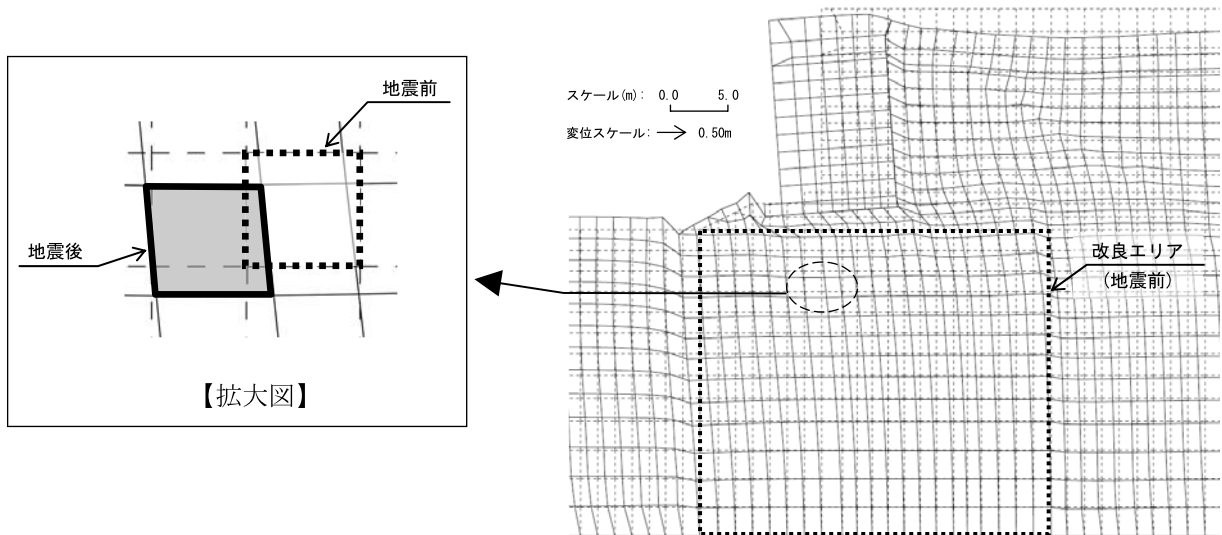


図-13 メッシュ変形図（ケース Sand-02，衝撃型地震動）

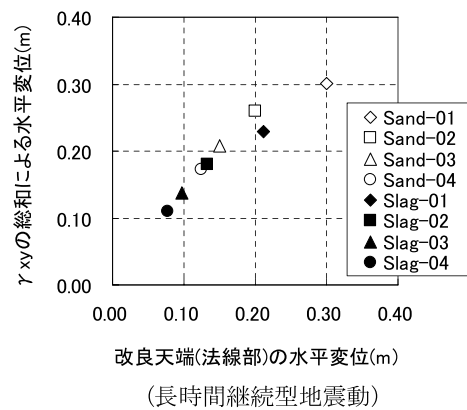
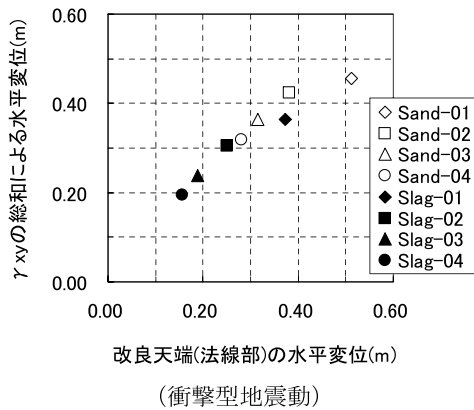


図-14 γ_{xy} の総和による水平変位の算定結果

ケーソン直下（法線部）の改良エリアの各要素について、解析で得られたせん断ひずみ γ_{xy} と要素高さ H とを掛け累計することで、改良天端の水平方向変位を算定した。図-14 に示すのは、 γ_{xy} の総和による水平方向変位と、図-12 に示したケーソン法線部の改良天端の節点での水平方向変位を比較した結果である。図のとおり、両者の水平変位量は概ね同程度の値を示しており、改良幅の相違による水平変位量の相違が、 γ_{xy} の総和による算定でも評価されていると言える。ただし、 γ_{xy} には要素の左右下端の鉛直方向位置が変化することによるひずみも加わるため、純粋に水平変位につながるひずみだけではない。この影響により、図-14 に示す γ_{xy} で評価した水平変位が若干大きめになる傾向にある。以上をまとめると、改良幅の増加に伴い、各要素の初期せん断応力比 τ_{max}/σ_m' が減少し、この τ_{max}/σ_m' に応じて最大せん断ひずみ γ_{max} が減少する関係がある。また、同様に、 τ_{max}/σ_m' に対して地震後に生じるせん断ひずみ γ_{xy} も関係づけられており、ケーソンの水平変位の評価にこれらの関係が使える可能性がある。

4. まとめ

高置換 SCP 改良地盤の地震時変形評価における改良幅の影響について、ケーソン式の重力式構造物のモデル断面を用いて地震応答解析を実施し分析した。検討の結果より得られた知見について以下に示す。

- 1) SCP 改良エリアにおける初期（地震前）のせん断応力比 τ_{max}/σ_m' と地震後の最大せん断ひずみ γ_{max} の分布状況を調べた結果、ばらつきをもちながらも曲線状に分布する傾向が確認された。また、この曲線状の分布傾向としては、地震動によって異なる曲線を持つことがわかった。
- 2) 1)において述べた τ_{max}/σ_m' と γ_{max} の曲線の関係は、SCP の材料を砂および鉄鋼スラグとした場合において異なる曲線となった。また特性の異なる長時間継続型・衝撃型のどちらの地震動においても、鉄鋼スラグを用いた方が同じ τ_{max}/σ_m' に対し γ_{max} が抑えられる傾向となった。
- 3) 1)において述べた τ_{max}/σ_m' と γ_{max} の曲線の関係は、SCP の材料と地震動が同じ条件の場合、改良幅の相違にかかわらずある特定の関係が存在することがわかった。

すなわち、SCP の材料および地震動特性に応じた τ_{max}/σ_m' と γ_{max} の関係がある。そして改良幅に応じて異なる値が生じる初期（地震前）の τ_{max}/σ_m' に応じた γ_{max} が発生することがわかった。

- 4) 本検討モデルでは、改良エリアにおける変形モードは海側へのせん断変形モードが卓越しており、 γ_{max} と γ_{xy} に関係が深いことから、 γ_{xy} についても 1)~3) に示す関係が存在し、また γ_{xy} の総和によって変形量が説明できた。つまり、変形モードが同様であることが前提となるが、初期応力状態によって変形量を評価できる可能性があることがわかった。

参考文献

- 1) (社)日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説、2007。
- 2) 杉山弥，井合進，小堤治，森浩章，野津光夫：SCP で改良された粘性土地盤上の重力式岸壁の地震時有効応力解析（その 1：高置換 SCP 改良地盤のモデル化），第 35 回地盤工学研究発表会，pp.2055-2056，2000。
- 3) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Strain space plasticity model for cyclic mobility, Soils and Foundations, Vol. 32, No.2, pp.1-15, 1992。
- 4) (財)沿岸技術研究センター：港湾構造物設計事例集（平成 19 年 改訂版）上巻，第 1 編第 7 章，pp.8-45，2007。
- 5) (財)沿岸技術研究センター：港湾構造物設計事例集（平成 19 年 改訂版）上巻，第 2 編第 1 章，p.66，2007。
- 6) 中原知洋，井合進，一井康二，小堤治，関谷千尋：解析プログラム FLIP における砂の細流分を考慮した解析定数簡易設定法，第 45 回地盤工学研究発表会，pp.1519-1520，2010。
- 7) 三上武子，小堤治，中原知洋，井合進，一井康二，川崎栄久：液状化解析プログラム FLIP のパラメータの簡易設定法（再訂版）の構築，第 46 回地盤工学研究発表会，pp.1627-1628，2011。
- 8) (社)地盤工学会：軟弱地盤対策工法—調査・設計から施工まで—，pp.120-121，1988。
- 9) 篠崎晴彦，森川嘉之，高橋英紀，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 改良地盤の地震時変形挙動（その 1：遠心模型実験），第 46 回地盤工学研究発表会，pp.1529-1530，2011。
- 10) 木下洋樹，森川嘉之，高橋英紀，一井康二，篠崎晴彦：固結特性を有する鉄鋼スラグを用いた SCP 改良地盤の地震時変形挙動（その 2：再現解析による検証），第 46 回地盤工学研究発表会，pp.1527-1528，2011。

(2011 年 6 月 27 日 受付)