

固結特性を有する鉄鋼スラグを用いたSCP改良地盤の 地震時変形挙動の評価

木下 洋樹*・一井 康二**・土田 孝**・森川 嘉之***・高橋 英紀****・
篠崎 晴彦*****・丸山 憲治*****・高橋 裕徳**

Assessment of seismic behavior of improved ground by Sand Compaction Pile Method using solidified iron and steel slag

Hiroki KINOSHITA, Koji ICHII, Takashi TSUCHIDA, Yoshiyuki MORIKAWA, Hidenori TAKAHASHI,
Haruhiko SHINOZAKI, Kenji Maruyama and Yasunori TAKAHASHI

The Sand Compaction Pile Method (SCP) is a major method to improve soft clay ground. Natural sand is generally used as a filling material of SCP. However, iron and steel slag has been recently applied as a new material because natural sand is difficult to be obtained in Japan. And, it is one of the important problems to clarify seismic behavior in applying such a new material. In this study, the cyclic loading tests using hollow cylindrical torsional test apparatus and dynamic centrifuge model tests were conducted to investigate the seismic behavior of improved ground using iron and steel slag. Furthermore, the deformation behavior of these materials is examined through simulation of the results of these tests by numerical analyses.

Key words: SCP method, Iron and steel slag, seismic behavior, dynamic centrifuge model test, numerical analysis

1. はじめに

国土が海に囲まれ、また多くが山岳地帯で占められているわが国では、沿岸部における土地利用と港湾施設の整備が広く行われている。このような沿岸部においては、軟弱な粘性土地盤が堆積していることが多く、ケーソン等の重力式構造物構築時における課題となることが多い。この軟弱地盤対策としてサンドコンパクションパイル工法（SCP工法）が代表的な工法として用いられている。

SCP工法は、その中詰め材料として一般的に良質な天然砂を用いる工法である。しかしながら、近年、天然砂の枯渇、環境保全の点から代替材の適用が検討されており、この代替材の一つとして鉄鋼スラグが挙げられている¹⁾²⁾。

鉄鋼スラグは、鉄鋼の製造工程にて発生する副産物であり、リサイクル材料として様々な用途に活用されている³⁾。その特性としては、天然砂よりも高い内部摩擦角とともに水硬性が挙げられ、昨今、適切に品質管理を行うことで、固結強度を安定して確保する鉄鋼スラグの開

発も行われており⁴⁾、従来の天然砂によるSCP改良地盤と比較して、安定性ならびに変形抑制効果が期待できる可能性がある。このような観点から、固結特性を有する鉄鋼スラグによるSCP改良地盤の埋立載荷荷重に対する変形モードの確認ならびに安定性の検討がなされており、その有効性が示されている⁵⁾。

一方で、このような固結特性を有する鉄鋼スラグの活用を推進していくためには、地震時の変形挙動をあきらかにし、その評価手法を構築することが重要な課題として挙げられる。

そこで本研究では、固結特性を有する鉄鋼スラグによるSCP改良地盤の地震時における変形挙動について、中空ねじりせん断試験機を用いた複合地盤の繰返し載荷実験、ならびに基礎地盤を鉄鋼スラグ改良地盤とする重力式ケーソンを模擬した断面に対する遠心模型振動実験の結果から調べるとともに、鉄鋼スラグによる改良地盤の変形評価の方法について有効応力解析を用いて検討を実施した。

* 株式会社不動産テトラ 建設本部 地盤事業部 技術部
** 広島大学 大学院工学研究科 社会環境システム専攻
*** 国土交通省 関東地方整備局 横浜港湾空港技術調査事務所（前・港湾空港技術研究所）
**** 港湾空港技術研究所 地盤 構造部
***** 新日本製鐵株式会社 環境・プロセス研究開発センター 土木建築技術部
***** 株式会社ジオデザイン 技術部

2. 中空ねじりせん断試験機による載荷実験

2.1 実験方法

中空ねじりせん断試験機を用いた繰返し載荷実験は、Fig-1に示すように外径70mm、内径30mmの中空供試体に粘土とSCP改良杭からなる複合地盤状態の供試体を作製し、繰返しねじり載荷を行うことで実施する。

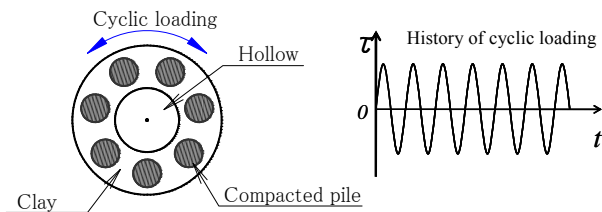


Fig-1 Concept of cyclic loading test.

粘土供試体は、AXカオリンとMCクレーを乾燥重量比1:1で混合したものをを用いた。これを初期含水比120%から圧密圧力74kPaで予圧密し、外径70mm、高さ80mmとなるように整形し、所定の改良位置にドリルを用いて孔を開け、凍結させた改良杭を挿入する。最後に中空部（内径30mm）をくり貫き供試体を作製した。本実験では改良率 a_s を30%とした。改良率とは、供試体の体積に占める改良杭の体積比率である。完成した供試体写真をFig-2に示す。以上により作製した粘性土と改良杭からなる複合供試体を試験機にセットし、有効拘束圧74kPaで等方圧密を行った後に、非排水条件で応力制御による繰返しねじり載荷を行った。なお、せん断応力比は0.3とし、載荷周波数は0.1Hzとした。



Fig-2 Photo of cylinder test piece.

本実験のケースは改良材を豊浦砂および鉄鋼スラグとした2ケースで実施した（Table-1）。豊浦砂は相対密度 $D_r=80\%$ になるように振動を与えて締固めた後に凍結して作製した。鉄鋼スラグは粒径2mm以下に粒度調整の上で所定の密度となるように詰め、所定の期間養生させた後に凍結して作製した。鉄鋼スラグ杭の三軸圧縮試験（CD試験）による強度特性は $c_d=111\text{kN/m}^2$ 、 $\phi_d=46^\circ$ であり、文献⁶⁾に示されている方法を用いて三軸圧縮試験の残留状態から算出したせん断抵抗角 ϕ は 47° であった。なお

三軸圧縮試験は、実験で用いる鉄鋼スラグと同じ条件（凍結と融解を含む）での供試体に対し行ったものである。

また、実験においては杭部の過剰間隙水圧の挙動に着目し、遮水シートを用いて杭部のみの間隙水圧を測定した。

Table-1. The test cases of cyclic loading.

Case	Material of SCP	Area ratio
1-1	sand	30%
1-2	slag	30%

2.2 実験結果

実験により得られたせん断ひずみと間隙水圧の履歴をFig-3（Case1-1）およびFig-4（Case1-2）に示す。

間隙水圧の履歴に着目すると、過剰間隙水圧が上昇から下降に急遽転換している状況となっており、せん断とともに有効応力の回復（過剰間隙水圧の低下）が現れるサイクリックモビリティが確認された。

この挙動は、Case1-1およびCase1-2の両ケースともに同様の傾向が認められており、締固められた砂で顕著に現れる正のダイレイタンスの特性が、締固めされた鉄鋼スラグにおいても発生することが分かった。

また、Fig-5に示す両振幅せん断ひずみ-加振回数から、両ケースのせん断ひずみの進展を比較したところ、Case1-2の方がCase1-1と比較してせん断ひずみの進展が抑制されることが分かった。

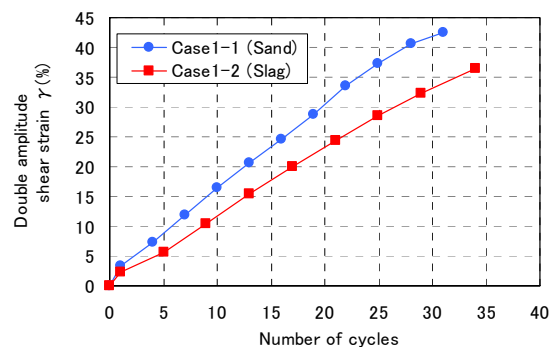


Fig-5 Time histories of double amplitude shear strain.

3. 遠心力場での模型振動実験

3.1 模型実験の方法

独立行政法人港湾空港技術研究所が所有する遠心力載荷実験装置を用いて、重力式ケーソン直下を地盤改良した場合の挙動を検討した。模型の概略図をFig-6に示す。支持層は相馬珪砂（相対密度約90%）とし、その上に正規圧密状態のカオリン粘土（強度増加勾配は実物スケー

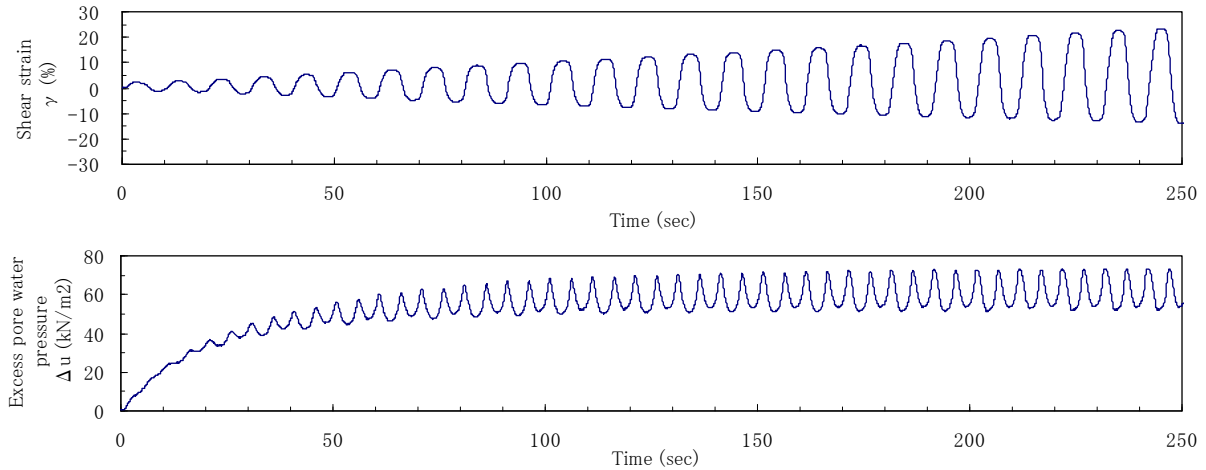


Fig-3 Time histories of Case1-1.

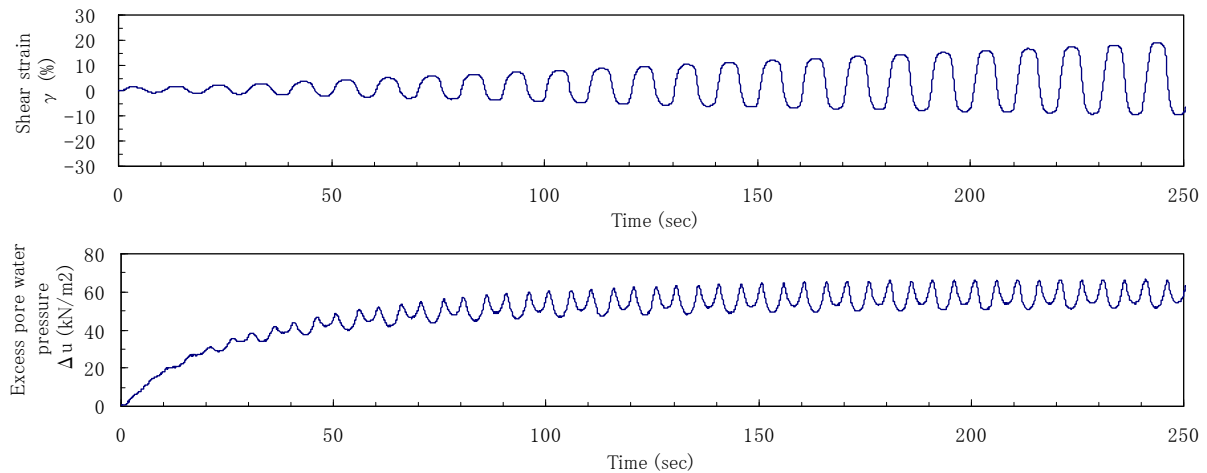


Fig-4 Time histories of Case1-2.

ルで $2.65\text{kN/m}^2/\text{m}$ からなる地盤を用いた。支持層は空中落下法で、粘土層は50Gの遠心加速度による自重圧密で作製し、ケーソン下部の粘土地盤にアルミ型枠を挿入して粘土をくり抜き、できた孔に凍結させた砂あるいはスラグによる壁式ブロックを打設した。壁式改良は、改良杭が密に配置され互いに接する状態を模擬したものである。そして、改良領域の上部に砕石によるマウンドを作製し、その上にケーソンを設置した。ケーソン背面の埋立土は、相馬珪砂による地盤を相対密度が約70%となるように空中落下法にて作製している。

作製した地盤に対し遠心加速度を段階的に増加させて各段階での圧密を確認しながら50gまで増加させた。なお、遠心加速度12.5gの段階で、所定の水位となるように模型地盤に脱気水を浸透させている。

実験ケースは、改良材を豊浦砂および鉄鋼スラグとした2ケースであり、どちらの改良率も58%としている (Table-2)。壁式の改良壁は、鉄製型枠を用いて作製する。豊浦砂は、小型の振動台を用いて締固めた後に凍結

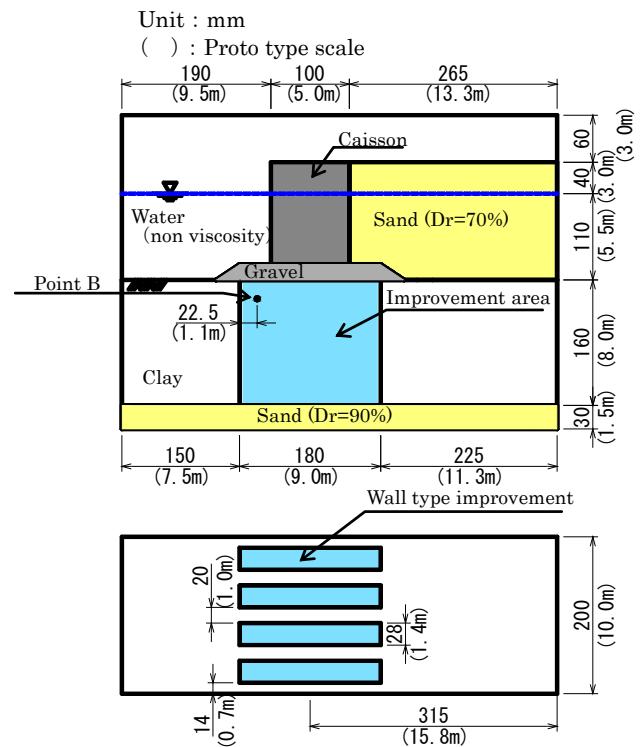


Fig-6 Diagram of dynamic centrifuge model test.

させたものであり、相対密度は約75%であった。また鉄鋼スラグは、密度管理で詰め所定の期間養生させた後に凍結させたものであり、三軸圧縮試験（CD試験による強度特性は $c_d=69\text{kN/m}^2$ 、 $\phi_d=45^\circ$ 、文献⁶⁾に示されている方法を用いて三軸圧縮試験の残留状態から算出したせん断抵抗角 ϕ は 43.5° であった。なお三軸圧縮試験は、実験で用いる鉄鋼スラグと同じ条件（凍結と融解を含む）での供試体に対し行ったものである。

実験では、所定の遠心加速度（50g）で自重圧密が完了した後に、加振装置によって模型地盤にシナリオ波の振幅倍率を徐々に大きくするステップ加振（0.1倍、0.7倍、1.0倍）を実施した。シナリオ波0.7倍のケースにおける水平加速度の時刻暦をFig-7に示す。

Table-2. The test Cases of dynamic model test.

Case	Material of SCP	Area ratio
2-1	Sand	58%
2-2	Slag	58%

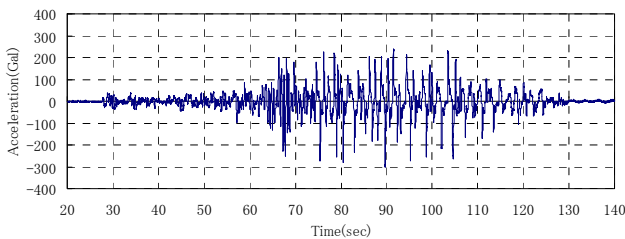


Fig-7 Input wave (horizontal acceleration).

3.2 実験結果

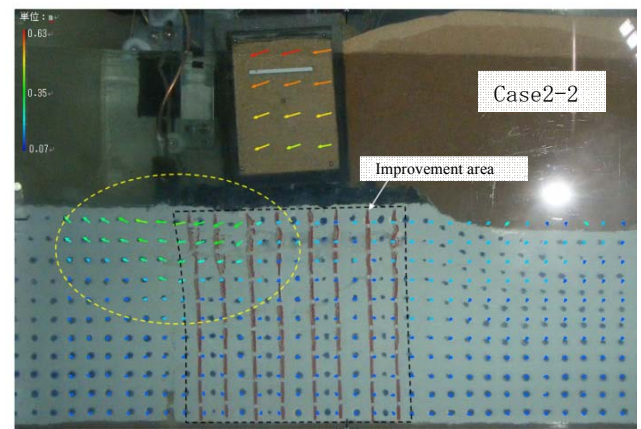
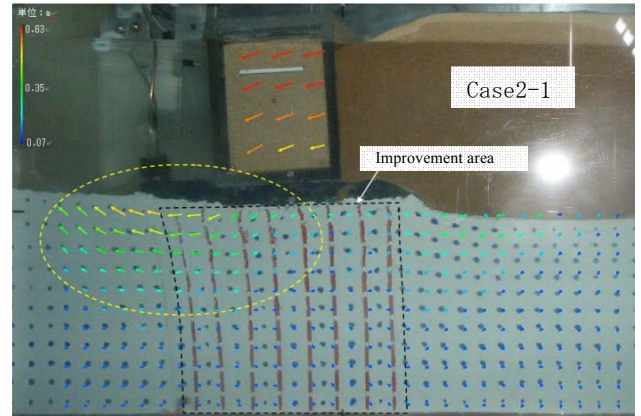
実験では、試料容器側面ガラス面側の粘土地盤に設置したターゲットを写真撮影しており、それを画像解析することで、シナリオ波の各振幅倍率における地盤変位を測定し変位の挙動を追跡することが可能である。Fig-8にシナリオ波0.7倍による加振後の各ケースにおける変形ベクトル図を示す。

改良領域において着目すると、改良領域は全体的に海側にせん断変形しており、改良領域における地盤変位は改良領域の海側上部において比較的大きく生じていることがわかる。このような変形は、この領域の拘束圧が小さいとともに、上部ケースンからの反力がこの領域に集中して作用するために、局所的なせん断破壊が進行したと推測される。

この傾向は、Case2-1とCase2-2で同様の傾向であり、砂を用いた改良地盤、スラグを用いた改良地盤で、同様の変形モードとなることが分かった。

また、改良領域のターゲットポイントにおいて水平変位を比較した結果をFig-9に示す。図からあきらかなよう

に、水平残留変位量は、砂をもちいたCase2-1よりも鉄鋼スラグを用いたCase2-2が小さくなっている状況が分かる。



※Proto type scale

Fig-8 Displacement vector (after shaking).

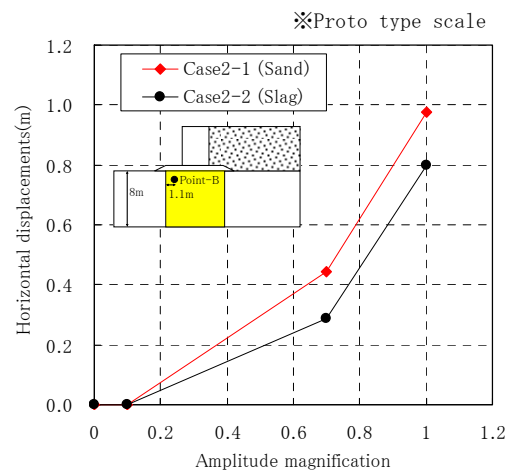


Fig-9 Residual displacements (Point B).

4. 有効応力解析による検討

4.1 検討方針

上記の遠心力場の模型実験結果において、鉄鋼スラグSCP改良部の変形モードは従来の砂による改良部の変形挙動と同様のモードであることが分かった。さらに、中空ねじり試験結果から、締めめられた砂で顕著に生じるサイクリックモビリティが、締めめられたスラグにおいてもさらに明瞭に生じていることが確認された。これらのことから、鉄鋼スラグSCP改良部の地震時の変形挙動を評価する上では、ダイレイタンシー特性を適切に表現することが重要であると考えられる。

以上の点に留意し、鉄鋼スラグによるSCP改良部の評価手法について、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るFLIPを用いて検証する。

本検討ではまず、中空ねじりせん断試験機を用いた繰返し載荷実験において得られた、繰返し載荷回数とせん断ひずみの関係 (case1-2) にフィッティングするようにダイレイタンシー特性を表現する各種パラメータの設定を検討し、これを用いて遠心力場の模型振動実験結果 (case2-2) の再現解析を実施する。

4.2 中空ねじり試験の解析とパラメータ設定

中空ねじり試験による繰返し載荷実験の複合地盤モデルを、Fig-10に示す。図に示すとおり、中空ねじり供試体の7分の1の部分に対して、粘土-SCP-粘土の2次元でモデル化し、SCP改良の幅は改良率相当となるように調整した。

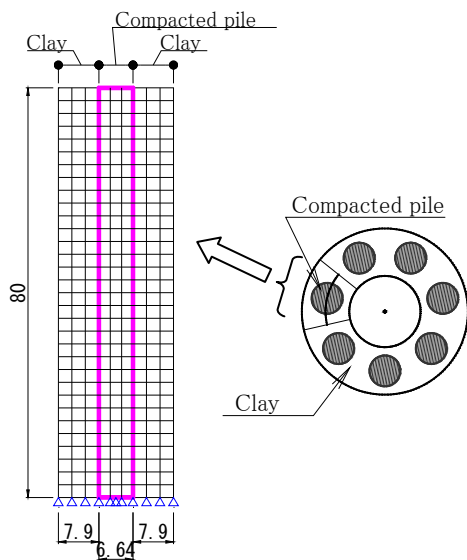


Fig-10 Analysis model of cyclic loading test.

中空ねじり試験と同様の載荷条件となるように、等方圧密段階では、下端面のY方向変位を固定、上端面のY方

向変位を等変位の拘束条件とし、上端面・下端面の中心部のX方向変位を固定した状態で、側方ならびに上端から等方に74kPaを載荷する。次に繰返し載荷課程では、下端面のX方向変位とY方向変位を固定し、上端面のX方向変位とY方向変位を等変位とする拘束条件、さらにモデルで対称となっている左端・右端の節点は循環境界となるようにX方向変位とY方向変位を等変位とする拘束条件とし、上端面に繰返し載荷を与える。

このモデルを用いて、FLIPにおいてダイレイタンシー特性を表現するパラメータである液状化パラメータ w_1 , p_1 , p_2 , c_1 , s_1 を設定する。

これらのパラメータは、塑性せん断仕事の関数から評価される過剰間隙水圧発生モデル (井合モデル) において与えられるパラメータである。各種液状化パラメータの詳細については参考文献を参照されたい⁷⁸⁾。

以降、設定した液状化パラメータについて詳述する。

① p_1

液状化過程 (過剰間隙水圧の上昇およびせん断ひずみ振幅の増大) の前半に関わる p_1 については、文献⁹⁾において、様々な土質条件の要素シミュレーションの結果、0.5に固定しても支障が無いことが確認されており、これに準拠する方針とする。

② p_2

液状化過程 (過剰間隙水圧の上昇およびせん断ひずみ振幅の増大) の後半に関わる p_2 については、Fig-11, Fig-12に示すように液状化試験における液状化時 (液状化の後半部分) のひずみの伸び方の違いを考慮した上で設定する手法が示されている⁹⁾¹⁰⁾。具体的にはFig-13のように液状化の後半におけるひずみの伸び方として勾配Bを定義している。この勾配Bに対する様々な要素シミュレーションが実施されており、細粒分含有率 F_c に対する p_2 の値の概略値、また勾配Bと p_2 の関係が、Fig-14~16に示すように検討されている。

鉄鋼スラグ改良杭を含む複合地盤の中空ねじりによる繰返し載荷実験結果のひずみの伸び勾配は、Fig.5に示したように緩く、「相対密度が大きい」あるいは「細粒分含有率が多い」とされる場合のひずみの伸び方に近い。これはスラグ単体でなく複合地盤全体のひずみであることに注意する必要があるが、Fig-13の定義に倣って勾配Bを算定したところ、Fig-17を得た。これは、 $B=4.7$ に相当し、Fig-15およびFig-16より $p_2=0.5$ に相当する。

以上より、 $p_2=0.5$ と設定して良いと判断した。

③ c_1

c_1 は、鉄鋼スラグに対して実施した繰返し非排水三軸試験から得られている液状化抵抗曲線から、繰返し回数

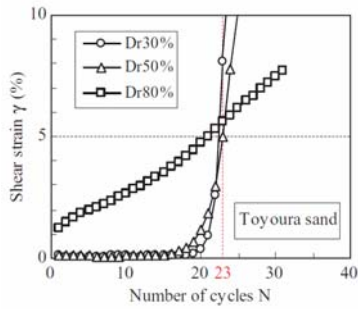


Fig-11 Relationships between shear strain and number of cycles of Toyoura sand.¹⁰⁾

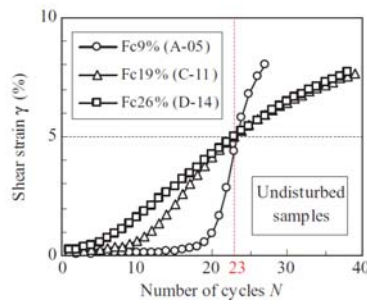


Fig-12 Relationships between shear strain and number of cycles of undisturbed samples.¹⁰⁾

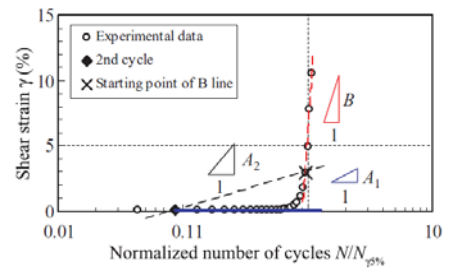


Fig-13 Modeling of relationships between shear strain and number of cycles(Schematic diagram of the model).¹⁰⁾

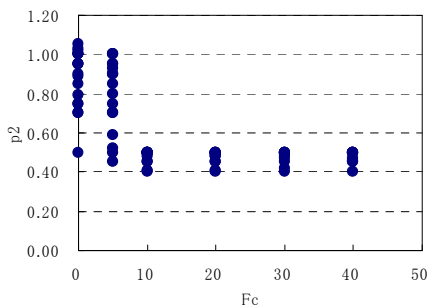


Fig-14 Relationships between parameter p2 and parameter Fc.⁹⁾

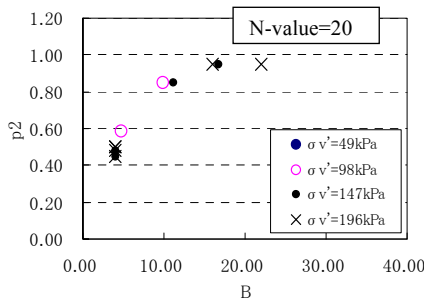


Fig-15 Relationships between parameter p2 and parameter B.⁹⁾

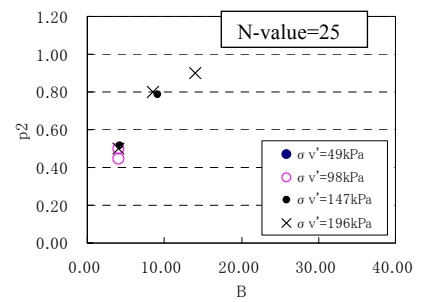


Fig-16 Relationships between parameter p2 and parameter B.⁹⁾

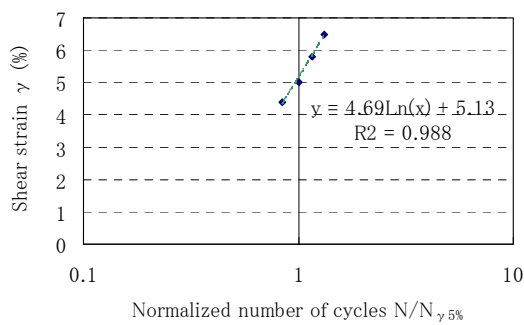


Fig-17 Relationships between shear strain and normalized number of cycles in cyclic loading test.

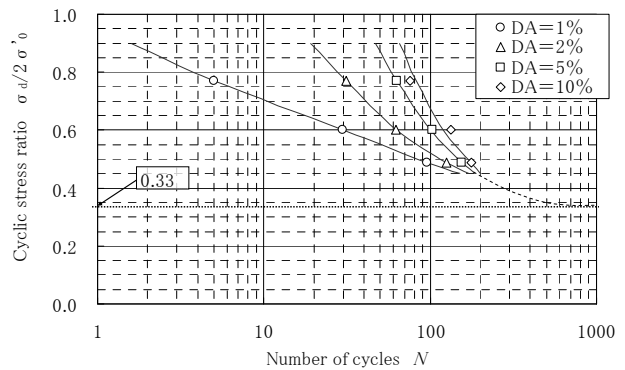


Fig-18 Relationships between cyclic stress ratio and number of cycles of slag.

が最大となる R_{max} に対するせん断応力比を求め、これより設定する。

塑性せん断仕事が累積しない状態として下式が成立することが示されている⁹⁾。

$$c1 \geq \frac{1}{(1 - (\tau / \sigma'_m) / \sin \phi_f)^2} \quad (1)$$

τ / σ'_m に対し、鉄鋼スラグの繰返し非排水三軸試験の結果であるFig-18より、 R_{max} としてせん断応力比0.33を用いて、c1を以下のように設定する。

$$c1 = 3.69$$

④s1

s1は液状化の限界状態を規定するパラメータであり、 $(1-s1)$ が過剰間隙水圧比の最大値を示すこととなる。

FLIPにおいては一般的に、限界最小値として0に近い小さい下記の値を用いることが多く、本検討においてもこれを設定する。

$$s1 = 0.005$$

変相角 ϕ_p については、FLIPの解析上で良く用いられる $\phi_p = 28^\circ$ とした。その他のパラメータを含めTable-3にまとめる。これらは、各種室内実験およびFLIPにおける一般値より設定したものである。

以上設定した液状化パラメータに対し、全体的な液状化強度をコントロールする液状化パラメータw1を変動させる。検討の結果、w1=30で、Fig-19に示すとおりせん断ひずみが10%程度までの範囲において、繰返し载荷回数とせん断ひずみの関係がフィッティングする傾向が得られた。

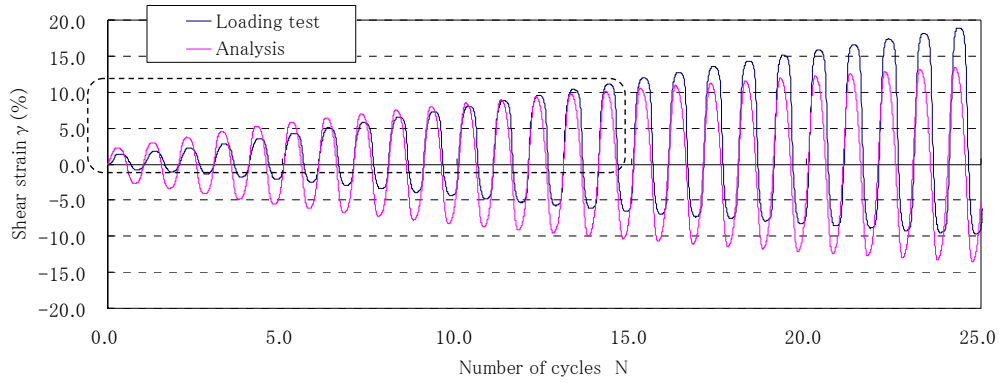


Fig-19 Comparison between test and analysis value.

Table-3 Parameters for analysis (Elements simulation).

Parameters	Slag	Clay	
Porosity n	0.45	0.55	
Poisson's ratio v	0.33	0.33	
Initial shear modulus G_{m0} (kN/m ²)	171900	1462	
Initial bulk modulus K_{m0} (kN/m ²)	448200	381	
Standard confining pressure σ_{m0} '(kN/m ²)	98	98	
Parameters depending confining pressure m_G, m_K	0.5	0.5	
Bulk modulus of pre water K_v (kN/m ²)	2.2E+06	2.2E+06	
Upper limit of dumping ratio h_{max}	0.129	0.200	
Cohesion C(kN/m ²)	0	16.9	
Internal friction angle ϕ_f (°)	47.3	6.7	
Phase transformation angle ϕ_p (°)	28.0	-	
Parameters related to dilatancy	s1	0.005	-
	w1	Variable	-
	p1	0.50	-
	p2	0.50	-
	c1	3.69	-

4.3 遠心力場の模型振動実験結果の再現解析

(1)解析方法

設定した液状化パラメータを用いて、鉄鋼スラグによる改良地盤に対して実施した遠心場での模型振動実験の再現性について検証する。再現解析は模型地盤の試料容器下端で計測されたシナリオ波0.7倍の地震動を用いて実施した。

なお、FLIPによる再現解析は2次元で実施するため、改良エリアの改良率を表現するために、Fig-20に示すような貼合せモデルを用いた。

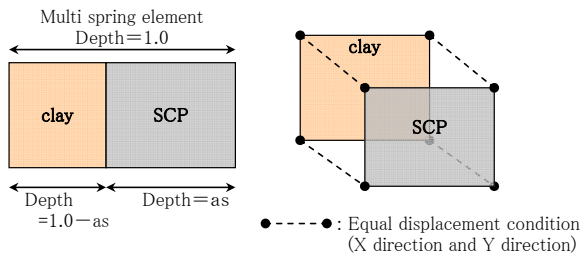


Fig-20 Concept of layered element model.

また、鉄鋼スラグ改良地盤部と粘土地盤部とを全て連動させた状態にて、初期応力状態を整えるための自重解

析を行った場合、粘土地盤部の変形が剛性の大きい鉄鋼スラグが変形しないことにより抑制され、粘土地盤部が上下に引っ張られた形となって応力状態を十分再現できない。そのため、2段階自重解析を行うことで粘土地盤部の初期応力状態を表現することとした。すなわち、第1段階で粘土地盤と鉄鋼スラグ改良部とをそれぞれで自重解析した後に、貼合せ部分の節点変位を拘束し、第2段階にて上部工を含めた自重解析を実施する。

解析に用いたパラメータをTable-4に示す。なお、ケーソンは線形平面要素でモデル化している。

Table-4 Parameters for analysis (Reproductiv analysis of dynamic centrifuge model test).

Parameters	Slag	Clay	Sand (Dr=70%)	Sand (Dr=90%)	Gravel
Porosity n	0.45	0.55	0.45	0.45	0.45
Poisson's ratio v	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
Initial shear modulus G_{m0} (kN/m ²)	171900	4255	~13340	98700	104300
Initial bulk modulus K_{m0} (kN/m ²)	448200	11000	~34800	257400	272000
Standard confining pressure σ_{m0} '(kN/m ²)	98	98	98	98	98
Parameters depending confining pressure m_G, m_K	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Bulk modulus of pre water K_v (kN/m ²)	2.2E+06	2.2E+06	2.2E+06	2.2E+06	2.2E+06
Upper limit of dumping ratio h_{max}	0.129	0.200	0.32	0.32	0.24
Cohesion C(kN/m ²)	0	0	0	0	0
Internal friction angle ϕ_f (°)	43.5	33.4	38.5	41	40
Phase transformation angle ϕ_p (°)	28.0	-	-	-	-
Parameters related to dilatancy	s1	0.005	-	-	-
	w1	30	-	-	-
	p1	0.50	-	-	-
	p2	0.50	-	-	-
	c1	3.69	-	-	-

(2)解析結果

メッシュ残留変形図をFig-21に示す。

Fig-21における変形モードは改良領域が全体的に海側に向かって大きく発生している状況となっており、Fig-8に示した動的遠心力載荷実験の変形モードが表現されて

いると言える。

さらに、Fig-22に示すのは着目ラインにおいて変形量を比較した結果である。変形量としてもほぼ同等の値を得られている。

ただし実験においては、海側上部の改良領域において、比較的大きなせん断変形が生じており、局所的なせん断破壊が進行したと推測されるが、繰返し載荷実験におけるFLIPによるシミュレーションの結果、実験と解析が良く整合するのはせん断ひずみとして $\gamma=10\%$ 程度までであり、FLIPにおいてはこの局所的なせん断変形までは十分に評価できていない可能性がある。

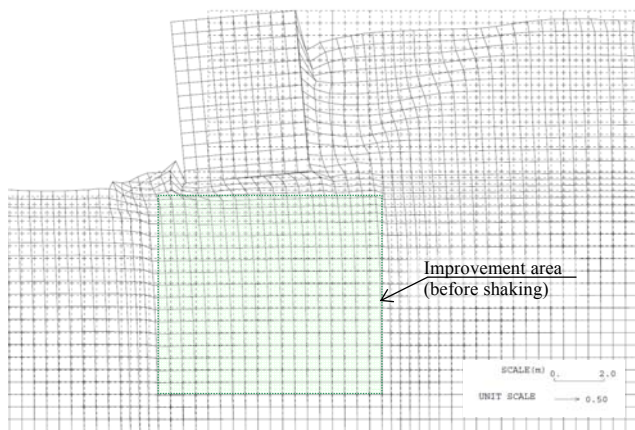


Fig-21 Analysis result (mesh deformation).

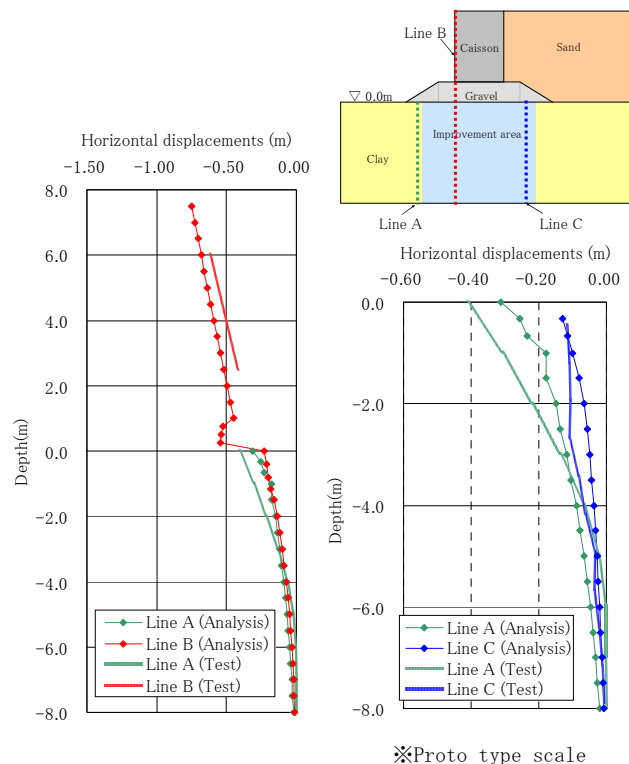


Fig-22 Comparison between test and analysis value.

5. まとめ

固結特性を有する鉄鋼スラグ改良地盤に対する地震時変形挙動について、中空ねじりせん断試験機を用いた複合地盤の繰返し載荷実験、ならびに基礎地盤を鉄鋼スラグ改良地盤とする重力式ケーソンを模擬した断面に対する遠心模型振動実験を実施して、その変形挙動を調べるとともに、有効応力解析プログラムFLIPを用いて評価手法を検討した。

得られた知見について以下に示す。

- 1) 鉄鋼スラグによる改良地盤と従来の砂による改良地盤の地震時変形モードは同様のモードとなることが分かった。
- 2) また、鉄鋼スラグによる改良地盤では砂による改良地盤よりも、その変形量が小さくなる傾向となり、地震時の変形抑制効果が高いことが分かった。
- 3) 鉄鋼スラグ改良部における繰返しせん断による挙動として、サイクリックモビリティが確認された。
- 4) 鉄鋼スラグによる改良地盤に対する地震時の残留変形を評価する場合、鉄鋼スラグのせん断強度および動的変形特性とともに、ダイレイタンス特性を適切に評価することで、有効応力解析プログラムの適用が可能である。ただし、この評価においては、要素試験等の結果に対して再現できるひずみの範囲において評価する必要がある。

【謝辞】

本稿において述べた、動的遠心力載荷実験ならびに有効応力解析における検証は、広島大学、港湾空港技術研究所、新日本製鐵、不動テトラとの共同研究（研究課題：鉄鋼スラグを用いたサンドコンパクションパイルによる地盤改良設計に関する共同研究）の一環として実施したものである。多大なご協力ならびにご助言をいただいた関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 港湾・空港等リサイクル推進協議会：港湾・空港整備におけるリサイクル技術指針，pp.3/99-3/102，2004
- 2) (財)沿岸開発技術研究センター，鉄鋼スラグ協会：港湾工事用製鋼スラグ利用手引書，pp.19-20，2000
- 3) 鉄鋼スラグ協会 ホームページ，<http://www.slg.jp/>
- 4) 沿岸技術研究センター：鉄鋼スラグを原料として固

結制御可能なサンドコンパクションパイル工法中詰め材料 エコガイアストーン, 港湾関連民間技術の確認審査・評価報告書, 第 06001 号, 2006

- 5) 高橋英紀, 森川嘉之, 篠崎晴彦, 新川直利, 丸山憲治: 固結特性を有する鉄鋼スラグを用いた SCP 改良地盤の遠心模型実験, 第 45 回地盤工学研究発表会講演集, pp.789-790, 2010
- 6) 菊池喜昭, 中島研司, 木村淳治, 水谷崇亮: 港湾工事に用いる高炉水砕スラグの硬化特性, 港湾空港技術研究所報告, 第 45 巻, 第 2 号, pp.105-133, 2006
- 7) 井合進: 液状化の二次元有効応力解析において破綻しない為の工夫をした一つのモデル, 土木学会第 43 回年次学術講演会講演概要集, pp.418-419, 1988
- 8) 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, No.869, 1997
- 9) 第四期 FLIP 研究会せん断変形ロック問題作業部会: FLIP 研究会 せん断変形ロック問題 WG 平成 19 年度 成果報告書, 2010.7
- 10) Mikami,T., Ichii,K., Iai,S., Ozutsumi,O., Nakahara,T. and Yokoyama,N. : Modeling of strain increase of liquefied soils in cyclic shear loading considering material characteristics, Performance-Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering — Kokusho,Tsukamoto & Yoshimine (eds), pp.1395-1401, 2009

平成22年10月29日 受理