

## SCP 改良地盤における杭間粘性土の状態が地震による変形に与える影響

An FEM Simulation on The Seismic Induced Deformation of  
SCP Improved Ground Considering The Inter-pile Ground Conditions

北出圭介	Keisuke KITADE	(中電技術コンサルタント (株))
一井康二	Koji ICHII	(広島大学工学研究院)
木下洋樹	Hiroki KINOSHITA	((株) 不動テトラ)
高橋裕徳	Yoshinori TAKAHASHI	(中電技術コンサルタント (株))

SCP 工法は、軟弱粘性地盤の改良方法として最も多く用いられている工法である。耐震性能照査を目的とした地震応答解析を行なう際に、砂杭と杭間の軟弱粘性地盤から構成される複雑な構造は、高置換改良(改良率 70%)の場合、杭間粘性土の剛性および強度を考慮しないのが一般的である。言い換えれば、剛性及び強度について SCP 杭のみが寄与するものとして評価する。しかしながら、実地盤における複合地盤の挙動は、砂杭と杭間粘性土の特性によるところが大きく、特に砂杭の間隔、杭間粘性土の強度は重要なパラメータである。本研究では、有効応力解析によって複合地盤の変形特性を捉え、SCP 改良地盤における杭間粘性土の状態が複合地盤の変形挙動に及ぼす影響を評価した。

キーワード：SCP 工法，FEM，複合材料

(IGC : E-8, H-1, K-5)

## 1. はじめに

軟弱地盤上に構造物を構築する場合、支持力対策、圧密沈下対策など、構造物の安定性向上を図るため、地盤改良が必要となる。軟弱地盤対策工法はこれまでに数多くの地盤改良工法が開発されているが、その中で最も広く利用されているのがサンドコンパクションパイル工法 (SCP 工法) である<sup>1)</sup>。この工法は、一般的に天然砂を中詰め材料として、軟弱地盤に砂杭を締め固めて打設することにより、地盤のせん断強度を増加させる工法である。SCP による改良効果は、粘土地盤に適用する場合と砂地盤に適用する場合がある。粘土地盤に適用する場合、粘土と砂杭の複合地盤となるため地盤強度が増加する。また、砂杭による排水効果で未改良部の粘土の圧密が促進され、砂杭打設時よりも強度が増加する効果が得られる。砂地盤に適用する場合の改良効果は、地盤強度の増加による液状化の抑制が期待される。

本研究では、粘土地盤に対する SCP 工法を対象とし、未改良部である杭間粘性土が経年変化により強度増加していくことによる改良地盤の挙動の変化、および現在の設計手法の問題点について、既往の研究<sup>2)3)</sup>を踏まえた解析的研究により考察を行なった。

## 2. SCP 改良地盤の変形特性に関する既往の研究

2.1 中空ねじりせん断試験機を用いた模型実験<sup>2)</sup>

木下ら<sup>2)</sup>は、中空ねじりせん断試験機を用い、SCP 工法によって改良された粘土地盤と砂杭の複合地盤に、繰返し荷が行なわれたときの挙動について、天然砂による改良杭と鉄鋼スラグによる改良杭との違いに着目して検討した。模型寸法は内径 3cm、外径 7cm、高さ 8cm である。用いられた模型と荷荷の概念図を図-1 に示す。実験により得られた時刻歴を砂杭(豊浦砂)の場合として、図-2 に示す。間隙水圧の時刻歴に着目すると、サイクリックモビリティが確認され、周囲を粘土に囲まれている状態においても締め固められた粒状材料としての特性が発生していることがわかる。これは、砂杭において過剰間隙水圧が発生するものの、正のダイレイタンスにより有効応力が回復するためであると考えられる。このことから、複合地盤の変形挙動を評価する際には、砂杭のダイレイタンス特性を適切に評価することが重要であると考えられる。

2.2 遠心力場での埋立模型荷重実験<sup>3)</sup>

高橋<sup>3)</sup>らは、剛性と強度が大きく異なる砂杭と粘土層の複合地盤に対して、複合地盤を構成する砂杭と杭間粘土のそれぞれの変形特性および破壊へ至る過程を調べるために、遠心荷重実験装置を用いた埋立荷重模型実験を行なった。図-3 に模型実験の概略図を示す。内寸法で横幅 120cm

×深さ 60cm×奥行き 20cm の試料容器に基礎砂層と粘性土層（粘性土層の一部に砂杭を打設）を作成している。さらに自重圧密後に電動モーターで作動する装置によりアクリル製の模型ケーソンを吊り下げて改良域上部に設置する機構となっている。実験手順は、模型地盤作成後、50g の遠心場で自重圧密させ、90%以上の圧密終了を確認した後に埋立载荷試験を実施した。ここでは、試験結果の一例を以下に記載する。

埋め立てを開始して変形量が十分大きくなるまで载荷した。载荷後の改良杭の写真を図-4 に示す。図より、改

良域は主に、海側へ水平変位し、下部ほど水平変位量は小さくなっている。改良域外の埋立側粘土層は海側下部方向へ変位し、海側粘土層は海側上部方向へ変位している。このことから、改良域は曲がるように変位し、改良域外部の粘土層は改良域の変形に追従するように変位することが明らかにされた。また、図-5 にせん断ひずみ分布を示す。砂杭のせん断ひずみは比較的小さく、杭間粘性土では最大で 20%の大きなせん断ひずみが発生している。これは、砂杭と杭間粘性土で異なる挙動が生じていることを示している。

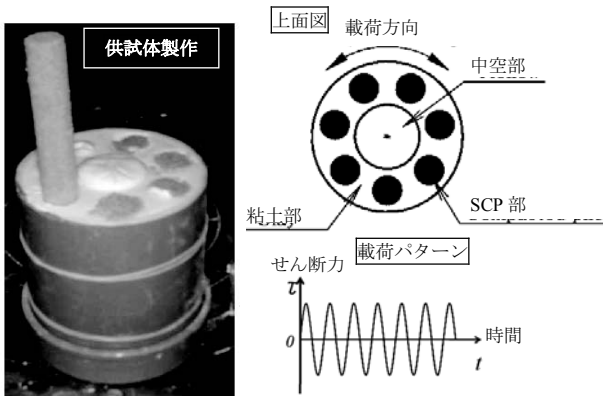


図-1 中空ねじりせん断試験機による繰返し载荷試験の概念図<sup>2)</sup>

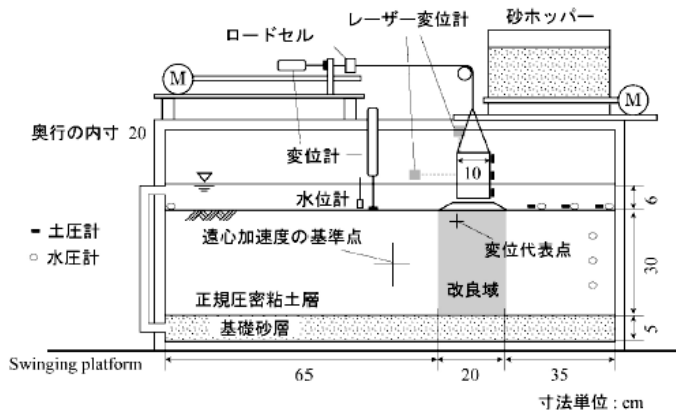


図-3 模型実験の概略図<sup>3)</sup>

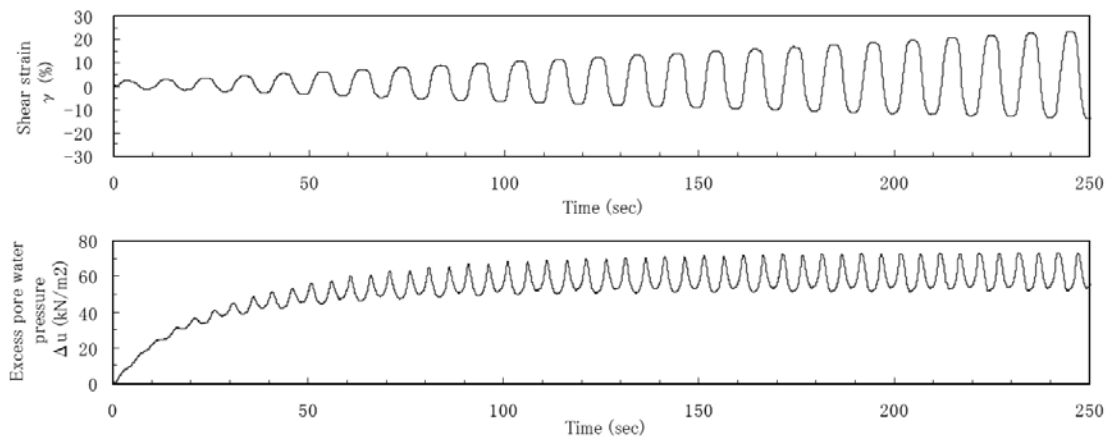


図-2 せん断ひずみおよび過剰間隙水圧の時刻歴（豊浦砂）<sup>2)</sup>

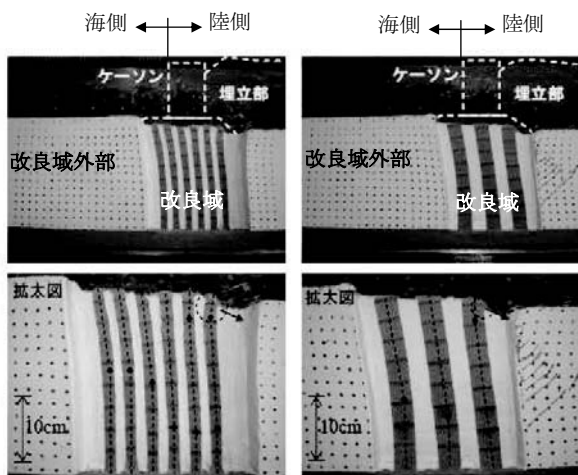


図-4 载荷試験終了時の改良杭の破壊状況<sup>3)</sup>

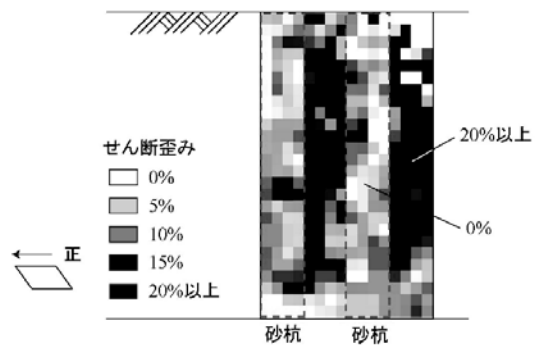


図-5 载荷試験終了時のせん断ひずみ分布<sup>3)</sup>

### 3. 2次元 FEM 解析による複合地盤の挙動の再現

$$\phi = 0.0003 \times D_r^2 + 0.0426 \times D_r + 36.682 \quad (5)$$

#### 3.1 目的

2.2 節で示されたように、杭間粘性土の状態は全体の変形特性に大きく影響するため、その影響の評価手法を検討しておくことは重要である。そこで、2.1 節で示した中空ねじりせん断試験機を用いた模型実験を対象に数値解析による検討を実施した。本章では、まず、中空ねじりせん断試験機を用いた模型実験<sup>2)</sup>の再現解析を示す。

#### 3.2 解析モデル

解析で使用したモデルを図-6 に示す。中央の図（供試体の上面図）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、粘土と SCP の循環境界になるように2次元でモデル化した。SCP 改良の幅を改良率相当となるように調整したもの（Type1：図-6 左側）、同じ改良率で、杭のアスペクト比の違いによる複合地盤の挙動の変化を検討するために、細い杭のモデル（Type2：図-6 右側）も作成した。また、従来の地震応答解析で用いられる砂単体モデル（奥行きを改良率で補正）も検討し、さらに、ダイレイタンスによる挙動の変化の影響を検討するために排水条件と非排水条件で解析を行なった。原地盤である粘土については、硬さにより3パターン作成した。検討ケース一覧を表-1 に示す。

解析プログラムは、旧運輸省港湾空港技術研究所が開発した、有効応力解析プログラム FLIP<sup>4)</sup> (Finite element analysis program for Liquefaction Process) を用いた。ここで、FLIP における排水条件と非排水条件の違いは間隙水要素の考慮の有無であり、排水条件では間隙水要素は無いものとして扱われ、非排水条件では間隙水要素が考慮され過剰間隙水圧の上昇に伴う有効応力の低下を再現する井合モデル<sup>4)</sup>が適用される。

地盤物性値は、砂杭と粘土の解析定数を表-2、表-3 に示す。砂杭はこれまでの実績より等価 N 値 20 相当なので簡易設定法<sup>5)</sup>により、以下に示すとおり動的変形特性を求めた。

$$N_{131} = N_{65} \times \{0.0041 \times (131 - 65) + 1\} + 0.019 \times (131 - 65) \quad (1)$$

$$G_{ma} = 14100 \times N_{131}^{0.68} \quad (2)$$

$$K_{ma} = \frac{2(1+\nu)}{3(1-2\nu)} G_{ma} \quad (3)$$

$$D_r = 21 \left( \frac{100N_{131}}{131+70} \right)^{0.5} \quad (4)$$

ここに、

$N_{65}$  : 等価 N 値 (有効上載圧 65kN/m<sup>2</sup> に対する N 値)

$N_{131}$  : 土圧係数 0.5 の基で、有効拘束圧 98kN/m<sup>2</sup> に対応する有効上載圧 131kN/m<sup>2</sup> に対する N 値

$G_{ma}$  : 有効拘束圧 98kN/m<sup>2</sup> に対するせん断弾性係数 (kN/m<sup>2</sup>)

$K_{ma}$  : 有効拘束圧 98kN/m<sup>2</sup> に対する体積弾性係数 (kN/m<sup>2</sup>)

$\nu$  : ポアソン比

$D_r$  : 相対密度

$\phi$  : せん断抵抗角 (°)

$C$  : 粘着力 (kN/m<sup>2</sup>)

杭間粘性土の動的変形特性の設定方法については、初期せん断剛性は、単調載荷試験を再現できるように、試行錯誤により設定し、有効拘束圧 98kN/m<sup>2</sup> に対するせん断弾性係数を求めた。せん断抵抗角と粘着力については、 $qu$  を仮定し、単調載荷試験におけるせん断ひずみとせん断応力の関係を基に強度増加率を考慮した値を算定した。

また、液状化パラメータについての定数の説明を以下に示す。詳しくは文献 5) を参照されたい。

$\phi_p$  : 変相角 (°) (一般的な値として 28° とした)

$s1$  : 液状化の終局状態を規定する係数 (0.005 とする)

$w1$  : 液状化特性の全体を規定する係数

$p1$  : 液状化過程の前半を規定する係数

$p2$  : 液状化過程の後半を規定する係数

$c1$  : 液状化発生の下限値を規定する係数

解析では、中空ねじり試験による載荷を模擬するため、2段階の解析フェーズを設けている。第1段階では、中空ねじり試験における 74kPa の等方圧密を再現し、第2段階では、模型試験における単純せん断状態を再現した。図-7 に載荷イメージを示す。左側と中央の図が実験時の条件を示す。左側の図のように上面にせん断力  $\tau$  を加え、供試体をねじっている。せん断力  $\tau$  は中央の図のように、時間とともに単調に増加させた。これを解析では、右図のように2次元のメッシュでモデル化し、上端に強制変位を加えた。強制変位では各ケースとも計算が発散するまで水平方向の変位をメッシュ天端の節点に与えている。また、境界条件は循環境界を再現するように、x 方向と y 方向にそれぞれ適切な拘束条件を設けた。そして、解析結果から供試体高さ H と強制変位後の  $\Delta l$  を用いて、 $\gamma_A = \Delta l / H$  で全体の平

均的なひずみとした。メッシュ天端の各要素に作用するせん断応力の平均値を  $\tau_A$  とした。

### 3.3 再現解析結果

解析ケース“Type1\_qu=50\_排水，非排水”および“Type2\_qu=50\_排水，非排水”について，単調せん断を行った後の変形図を図-8に，ひずみ分布図を図-9に示す。変形図では，太線で囲っている部分が砂杭である。変形図では各結果で顕著な差が見られないが，ひずみ分布図では，砂杭は曲げの変形モードであり，せん断ひずみが大部分で1%以下となっている。杭間の粘土は3%以上のせん断ひずみが発生しており，せん断の変形モードを示し，砂杭と杭間の粘土の変形挙動が明らかに異なっていることがわかる。なお，排水条件では非排水条件と比べ，Type1の杭間粘性土せん断ひずみが小さくなっている。これは，非排水条件では，ダイレイタンスの影響で砂杭の剛性が回復し，砂杭部の変形が抑制されることで，粘性土のせん断変

形が増加するのに対し，排水条件では，初期の砂杭と杭間粘性土の剛性に依じてせん断変形が分布しているものと考えられる。このことは，Type1の排水条件において，砂杭の上下のせん断ひずみが非排水条件の時よりも大きくなっていることから推察できる。

$\tau_A - \gamma_A$  について排水と非排水に分けて表記した関係を図-10に，アスペクト比 (Type1, Type2) に分けて表記した関係を図-11示す。杭間粘性土の強度が大きくなるにしたがって，一定のせん断ひずみに対して発生するせん断応力は大きくなる傾向となっている。しかし，この傾向の程度はアスペクト比や排水条件の違いに応じて異なる結果となっている。この違いについては次章で考察する。

中空ねじりせん断試験機を用いた模型実験<sup>2)</sup>の結果を図-10及び図-11に重ね書きして示す。実験条件と一致するケース“Type1\_qu=50\_非排水”とほぼ整合する結果となっており，解析の妥当性が確認できた。

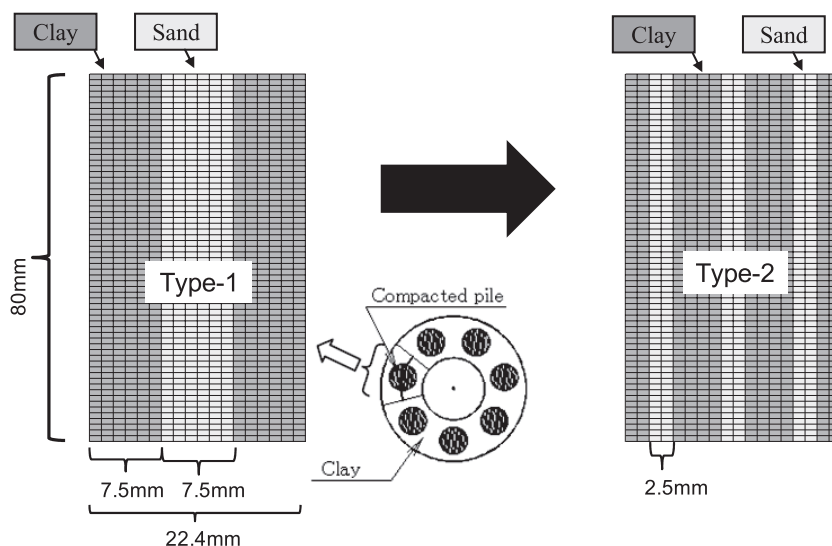


図-6 解析モデルと荷重イメージ

表-1 検討ケース一覧

ケース名	アスペクト比	材料	排水条件
Type1 砂単体_排水	Type 1	砂単体	排水
Type1 砂単体_非排水			非排水
Type1_qu=50_排水		砂+軟弱粘土( $q_u=50\text{kN/m}^2$ )	排水
Type1_qu=50_非排水			非排水
Type1_qu=98_排水		砂+中粘土( $q_u=98\text{kN/m}^2$ )	排水
Type1_qu=98_非排水			非排水
Type1_qu=147_排水		砂+硬い粘土( $q_u=147\text{kN/m}^2$ )	排水
Type1_qu=147_非排水			非排水
Type2 砂単体_排水	Type 2	砂単体	排水
Type2 砂単体_非排水			非排水
Type2_qu=50_排水		砂+軟弱粘土( $q_u=50\text{kN/m}^2$ )	排水
Type2_qu=50_非排水			非排水
Type2_qu=98_排水		砂+中粘土( $q_u=98\text{kN/m}^2$ )	排水
Type2_qu=98_非排水			非排水
Type2_qu=147_排水		砂+硬い粘土( $q_u=147\text{kN/m}^2$ )	排水
Type2_qu=147_非排水			非排水



表-2 解析に用いた地盤物性値（動的変形特性）

材料	湿潤単位 体積重量 $\gamma_t(\text{kN/m}^3)$	基準有効 拘束圧 $\sigma_{ma}'(\text{kN/m}^2)$	基準初期 せん断剛性 $G_{ma}(\text{kN/m}^2)$	基準初期 体積剛性 $K_{ma}(\text{kN/m}^2)$	ポアソン比	一軸圧縮 強度 $q_u(\text{kN/m}^2)$	粘着力 $C(\text{kN/m}^2)$	内部 摩擦角 $\phi(^{\circ})$
砂杭	20.0	98	131300	342400	0.33	0	0	41.4
軟弱粘土	16.5	98	1462	3813	0.33	50	16.9	6.5
中粘土	16.5	98	2924	7625	0.33	98	32.7	12.4
硬い粘土	16.5	98	4386	11438	0.33	147	49	18.3

表-3 解析に用いた地盤物性値（液状化パラメータ）

材料	変相角 $\phi_p(^{\circ})$	s1	w1	p1	p2	c1
砂杭	28	0.005	10.86	0.5	0.807	4.888

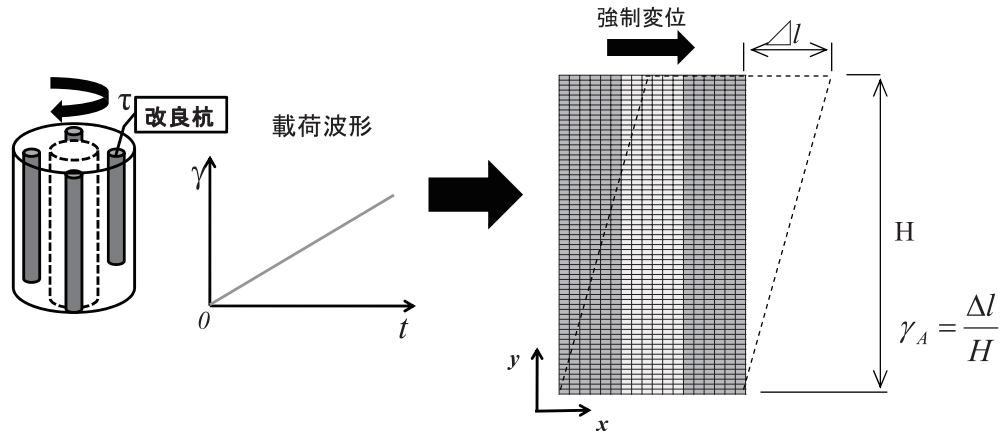


図-7 荷重イメージとモデルにおけるひずみの定義

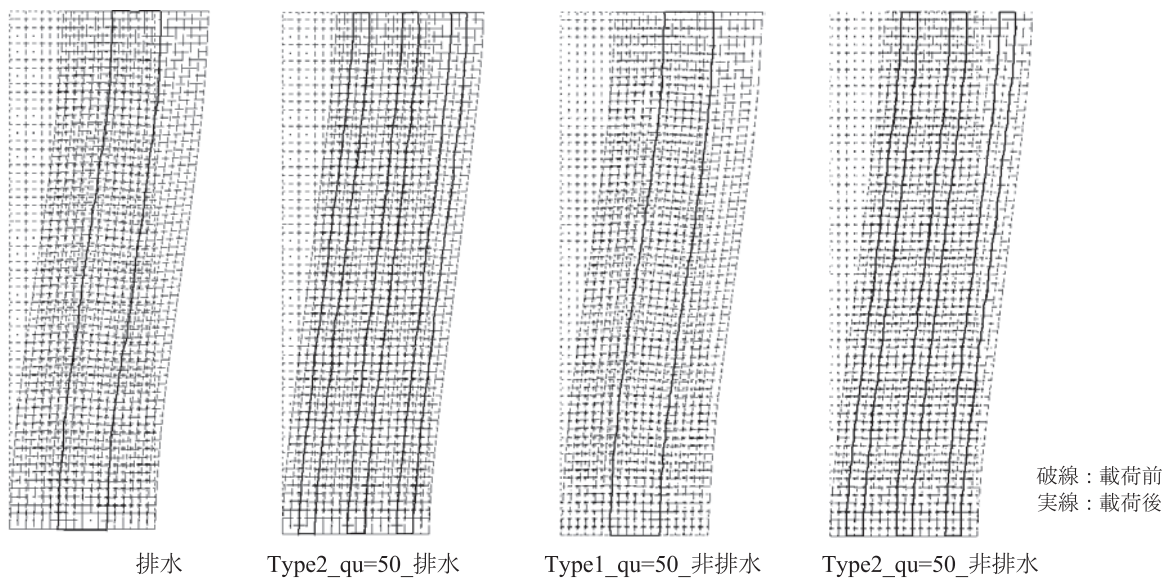


図-8  $\gamma_A=1.8\%$ 時点の変形図（太線で囲っている部分が砂杭）

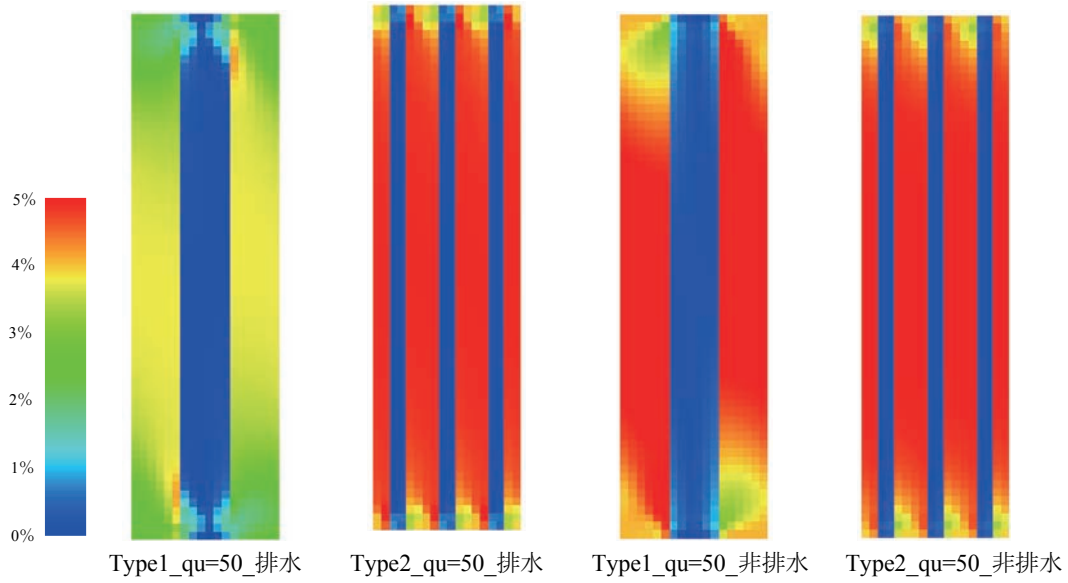
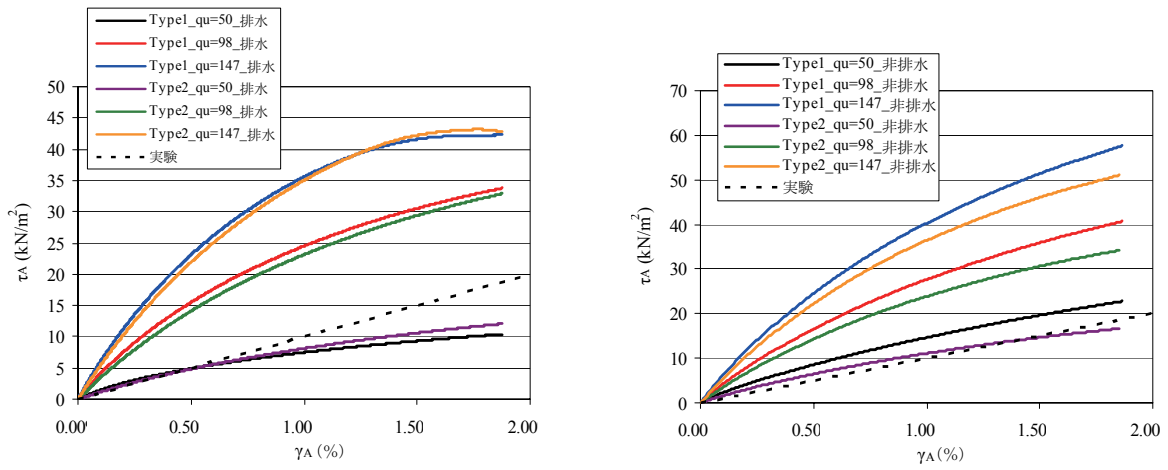


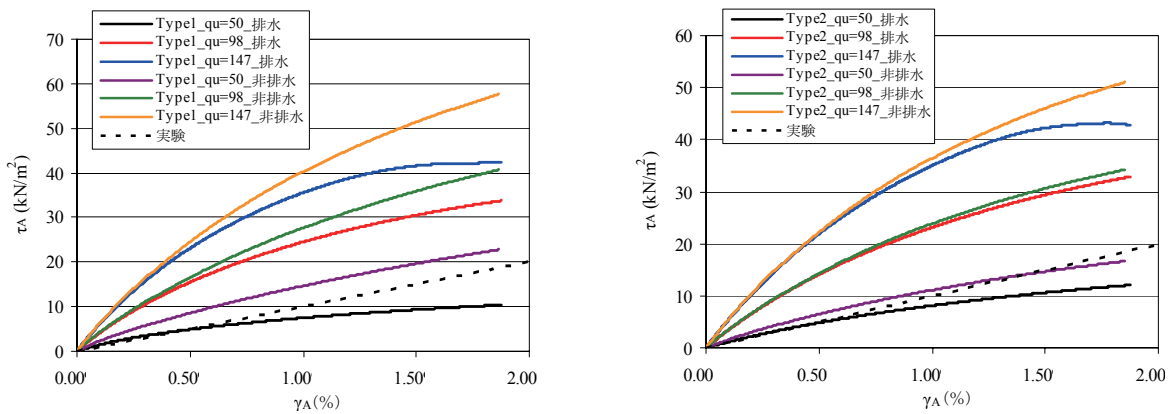
図-9 せん断ひずみ分布図



(a) 排水条件

(b) 非排水条件

図-10 せん断応力とせん断ひずみの関係



(a) Type1

(b) Type2

図-11 せん断応力とせん断ひずみの関係

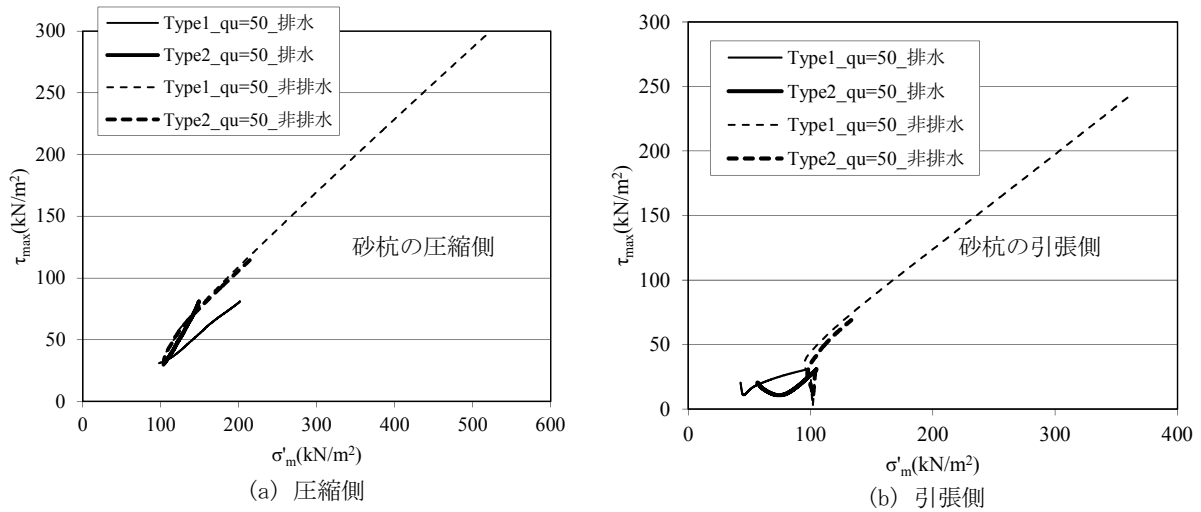


図-12 砂杭の圧縮側及び引張側の有効応力経路図

表-4 砂単体モデルに対する複合地盤のせん断ひずみの比

Case	排水条件	一軸圧縮強度 $q_u$ (kN/m <sup>2</sup> )	せん断応力10 kN/m <sup>2</sup> に対するせん断ひずみ (%)	砂単体モデルに対する比
砂単体 (奥行き0.7倍)	排水	-	0.02	1.00
軟弱粘土	排水	50	1.28	67.37
中粘土	排水	98	0.28	14.90
硬い粘土	排水	147	0.18	9.21
砂単体 (奥行き0.7倍)	非排水	-	0.02	1.00
軟弱粘土	非排水	50	0.61	32.26
中粘土	非排水	98	0.27	14.16
硬い粘土	非排水	147	0.18	9.21

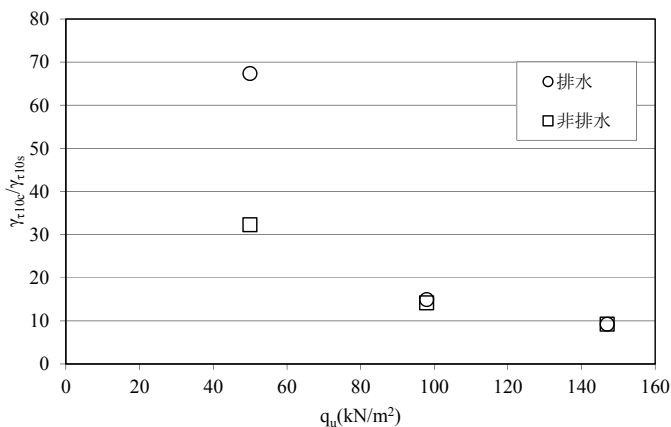


図-13 粘性土の強度と砂単体モデルとの差異に及ぼす影響

#### 4. 砂杭と杭間の粘土が複合地盤の変形特性に与える影響

##### 4.1 砂杭のアスペクト比によるせん断挙動の影響

図-10の排水条件では、Type1とType2で $\tau_A - \gamma_A$ の関係はほぼ同程度となっている。これは、排水条件の下では、正もしくは負のダイレイタンシーが発生しても、間隙水の

存在がないため、砂杭と杭間粘性土の初期剛性の違いによるものとなる。Type1とType2では、アスペクト比は異なるものの、改良率が同等(剛性も同等)であることが、Type1とType2の挙動が同じ傾向を示している理由であると考えられる。一方、非排水条件の場合には、Type2よりもType1の方がせん断応力が大きくなっている。これは、アスペクト比による影響と考えられる。応力経路図の図-12によれば、引張側は非排水条件でせん断応力が大きくなっているが、これは正のダイレイタンシーにより負の間隙水圧が生じることで、有効拘束圧が大きくなり強度が回復してより大きなせん断応力を負担できるためである。さらに、平面保持の仮定にしたがうとすると、アスペクト比が小さいほど(Type1)、杭端部の鉛直応力 $\sigma_y$ が減少し軸差応力が大きくなると考えられる。これは、図-11で、Type2よりもType1の方が排水条件と非排水条件に違いが生じていることも整合する。このように、非排水条件ではアスペクト比が変形モードに関係している。

## 4.2 杭間粘性土の影響

複合地盤では杭間粘性土にせん断ひずみが集中しているが、これは杭間の粘性土のせん断剛性が杭よりも小さいために粘性土がせん断変形をおこし、さらに粘性土の剛性低下が生じることで、砂杭同士にせん断応力が伝達されないために曲げに近い変形が起きていると推察される。杭間粘性土は、砂杭に十分な透水性があれば、経年により強度が増加する。杭間粘性土が、砂杭同士の応力を伝達するのに十分な強度を有していれば、複合地盤の変形挙動は、砂杭の曲げに近い変形が抑制され、奥行き幅を改良率で換算した砂単体のモデルの挙動に近づいていくと考えられる。

表-4 では、 $\tau_A=10\text{kN/m}^2$  のときのせん断ひずみ  $\gamma_{t10}$  について、砂単体モデル（奥行き 0.7 倍）の値 ( $\gamma_{t10s}$ ) に対する複合地盤モデルの値 ( $\gamma_{t10c}$ ) の比 ( $\gamma_{t10c}/\gamma_{t10s}$ ) を求めたものであり、図-13 は、杭間粘性土の強度と倍率 ( $\gamma_{t10c}/\gamma_{t10s}$ ) の相関関係を示したものである。砂杭打設直後の杭間粘性土が軟弱な場合は砂単体モデルに対する倍率が大きい非排水条件の方で、その差が小さい傾向にある。また、杭間粘性土の強度が大きくなるにしたがい、排水条件と非排水条件の差が小さくなる傾向も見られる。なお、ここでは砂単体モデルとの差が 10 倍以上と大きい、ここでモデル化した中空ねじり試験による模型実験供試体は改良率が低く、砂単体モデルで対象としている高置換改良とは条件が異なるためである。高置換率の複合地盤の挙動については、別途議論する必要がある。

## 5. 結論

本研究では模型実験の結果を踏まえ、FEM 解析により複合地盤の変形挙動を砂杭のアスペクト比、杭間粘性土の強度の観点から検討をした。その結果、以下の結論を得た。

1) 非排水条件のもとでは、砂杭のアスペクト比が複合地盤の挙動に大きく影響している。したがって、地震時の SCP 改良地盤の変形を考慮する際には、置換率にも依存すると考えられるが、少なくとも低置換率では、アスペクト比に留意しておく必要がある。

2) 杭間粘性土の強度が大きくなると、複合地盤のせん断変形は抑制される。これは、砂杭により杭間粘性土の圧密が進行した場合も同様な現象が生じると考えられる。メカニズムとしては、杭間粘性土の強度が大きくなるにしたがい、砂杭同士のせん断応力の伝達が発揮されることで、砂杭だけで受け持っていたせん断力を杭間粘性土も分担し、複合地盤全体のせん断強度が増加するためであると考えられる。

3) 杭間粘性土の強度の差による影響は、非排水条件より排水条件の方が大きい。また、杭間粘性土の強度が大きくなると、排水条件と非排水条件の差は小さくなる。また、低置換では砂単体モデル（改良率 70%）との変形量の差は、粘性土の強度が大きい場合でも 10 倍程度となり、砂単体モデルの適用には問題がある。高置換改良（改良率 70%）に対する検討は今後の課題である。

## 参考文献

- 1) Kitazume, M.: The Sand Compaction Pile Method, Balkema, p.232, 2005.
- 2) 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 Vol.7, No.1, pp.323-337, 2012.
- 3) 高橋英紀: 砂杭・粘性土複合地盤の破壊過程に関する基礎的研究, 港湾技研資料, No.1181, 2008.
- 4) 井合進, 松永康男, 亀岡知弘: サイクリックモビリティのモデルのパラメータの同定, 港湾技術研究所報告 VOL.29, No.4, pp.27-56, 1990.
- 5) 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ータの簡易設定法, 港湾技研資料, No.869, 1997.

(2012 年 6 月 25 日 受付)