

# 砂杭円筒拡径による改良時の自然堆積粘土地盤の挙動とその効果

名古屋大学工学研究科 国際会員 山田英司、野田利弘、浅岡顕  
 不動建設(株) 国際会員 野津光夫

## 1 はじめに

骨格構造が発達した自然堆積粘土地盤を、サンドコンパクションパイル(SCP)工法などの砂杭円筒拡径によって改良する場合、間隙比が減少したにもかかわらず、「乱れ」が生じてかえって強度が低下することがある。本論文では、土の骨格構造<sup>1)</sup>(構造・過圧密・異方性)の働きを記述する弾塑性モデル(SYS Cam-clayモデル)<sup>2)</sup>を用いた水～土連成計算<sup>3)</sup>によって、砂杭打設中および打設後における杭周の自然堆積粘土地盤の挙動と改良効果を調べた。

## 2 計算条件と地盤の初期状態

図1に示す層厚15mの地盤に対し、半径20cmのケーシングパイプで、杭間隔2m(置換率12%)、半径35cm、長さ15mの砂杭一本を14.4分で打設するSCP工法を想定する。実施工では隣り合う砂杭の同時打設はないが、最も簡単な条件として砂杭一本の打設過程を軸対称条件で計算する。計算領域は杭周地盤だけで、図2はその有限要素メッシュと境界条件である。砂杭打設側の境界は排水条件とし、ケーシングパイプの押し込みに伴う「拡径」と引抜きに伴う「除荷」の繰り返しによって砂杭打設を再現し、その後圧密放置した。砂杭の円筒拡径は地盤深部から順次与える強制水平変位で表現した(0.3cm/secの変位速度で15cm拡径)<sup>4)</sup>。

下層に粘土(層厚13m)、上層に中密な砂(層厚2m)が自然堆積した地盤を想定し、表1に示すパラメータ群と表2に示す地盤内全域で一様な初期値を用いて、土被りに応じて地盤内の初期間隙比分布を決定した(図3)。本論文では、粘土層の初期値のみが異なる2種類の地盤(地盤A:粘土層は初期状態において構造が低位で正規圧密状態、地盤B:粘土層は構造が高位で過圧密状態)を想定した。

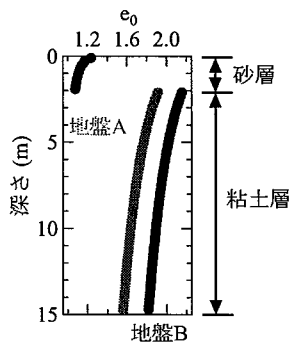


図3 初期間隙比分布

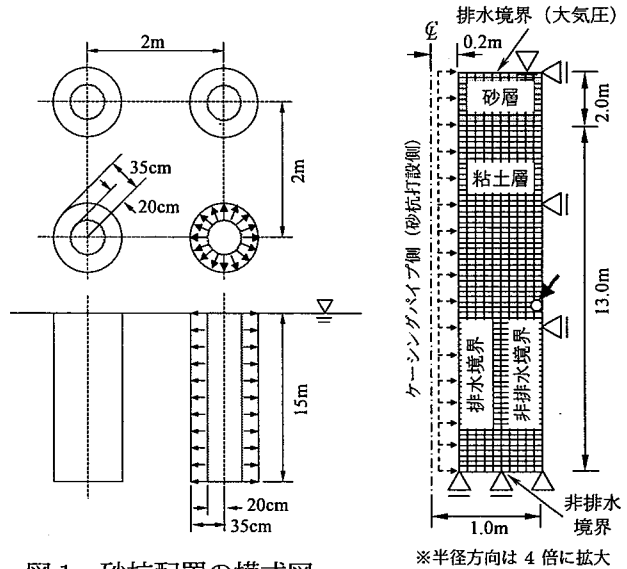


図1 砂杭配置の模式図

図2 有限要素メッシュ

表1 地盤の材料定数

	粘土層	砂層
<弾塑性パラメータ>		
圧縮指数 $\lambda$	0.20	0.05
膨潤指数 $\kappa$	0.05	0.01
限界状態定数 M	1.4	1.3
正規圧密線の切片 N	2.5	2.0
( $p' = 98\text{kPa}$ での繰り返し土の正規圧密線上の比体積)		
ポアソン比 $\nu$	0.3	0.3
<発展則パラメータ>		
構造低位化指数 $a$ ( $b = c = 1.0$ )	0.8	1.0
正規圧密土化指数 $m$	5.0	0.05
回転硬化指数 $b_r$	0.001	1.0
回転硬化限界定数 $m_b$	1.0	0.5
透水係数 $k(\text{cm/sec})$	$7.4 \times 10^{-8}$	$4.0 \times 10^{-2}$
土粒子の密度 $\rho_s (\text{t/m}^3)$	2.65	2.65

表2 地盤の初期値

	粘土層		砂層
	地盤 A	地盤 B	
構造の程度 $1/R_0^*$	1.0	10.0	1.5
過圧密比 $1/R_0$	1.0	2.0	3.0
応力比 $\eta_0$	0.38	0.38	0.23
異方性の程度 $\zeta_0$	0.38	0.38	0.23

Improvement of highly structured clayey soil by cavity expansion

Yamada, E., Noda, T., Asaoka, A. (Nagoya Univ.) and Nozu, M. (Fudo Construction Co.)

### 3 計算結果

#### 3.1 砂杭打設中および打設後の自然堆積粘土地盤の挙動

##### (1) 間隙比減少量と地表面変位

表3に砂杭円筒拡径による粘土地盤の間隙比減少量と砂杭打設終了時および圧密終了時の地表面変位を示す。地盤Aに比べ地盤Bは間隙比減少量が多い。また、砂杭打設終了時の地表面変位は両地盤でほとんど同じであるが、砂杭打設終了時から圧密終了時までの沈下量を比べると、地盤Bの方が地盤Aより大きくなっている。

表3 間隙比減少量と地表面変位

	地盤 A	地盤 B
間隙比減少量	0.06	0.22
地表面変位 (打設終了時)	135.1 cm	135.2 cm
地表面変位 (圧密終了時)	101.4 cm	27.9 cm
砂杭打設後の沈下量	33.7 cm	107.3 cm

注) 間隙比減少量：圧縮を正とする

地表面変位：初期状態からの隆起を正とする

##### (2) 地盤 A (粘土層：構造低位、正規圧密) の挙動

図4～図6に地盤Aの初期状態(改良前)と拡径開始から7.2分後(砂杭打設中)、14.4分後(砂杭打設終了時)、643日後(圧密終了時：改良後)における地盤内の過剰間隙水圧分布、間隙比変化分布、過圧密比(1/R)分布を示す。

① 砂杭打設中(14.4分後まで)の挙動 粘土層の透水係数が小さいため、砂杭円筒拡径によって発生する過剰間隙水圧が粘土層内に蓄積し(図4)、間隙比はほとんど変化しない(図5)。強制変位を与えている拡径部分より下に位置する拡径済みの部分では、ケーシングパイプ引抜きに伴う「除荷」により過圧密になる(図6)。

② 砂杭打設後の放置過程(14.4分以後)の挙動 砂杭円筒拡径によって粘土層に蓄積した過剰間隙水圧が消散して圧密が進行し(図4)、粘土層全体で間隙比が減少している(図5)。また過圧密も解消していくが、砂杭打設側から最も離れた領域では若干過圧密な状態が残っている(図6)。

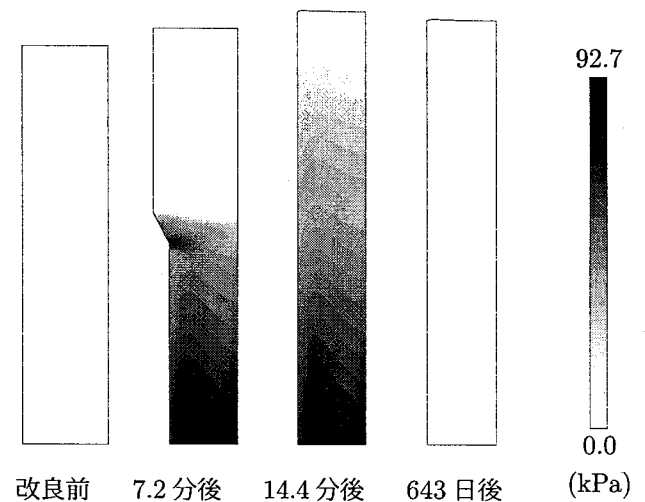


図4 過剰間隙水圧分布(地盤A)

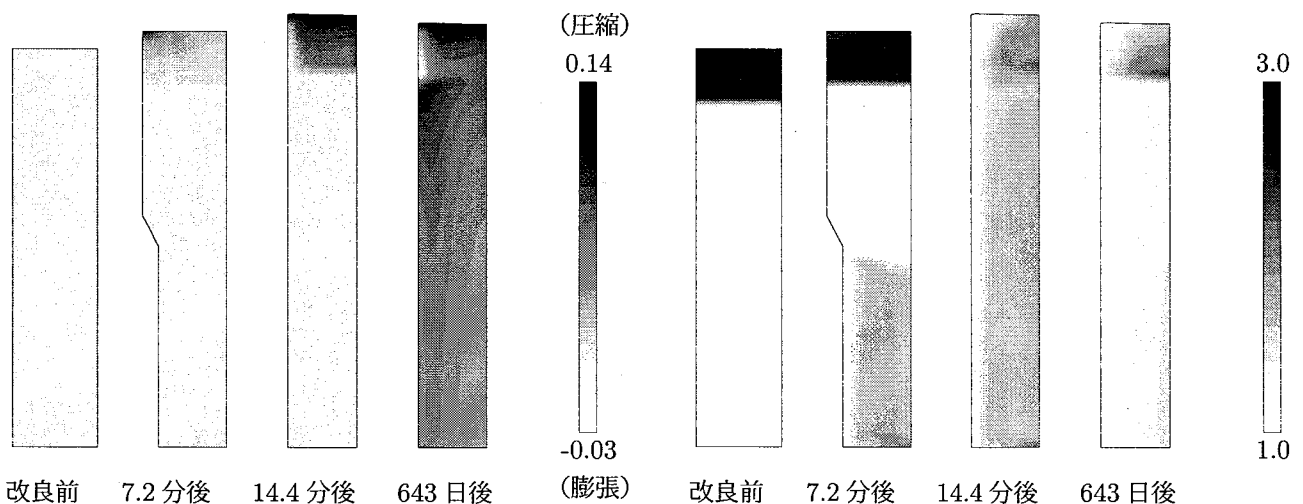


図5 間隙比変化分布(地盤A)

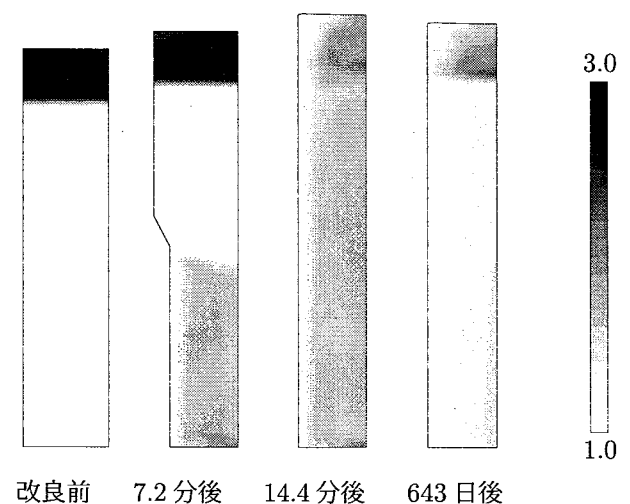


図6 過圧密比(1/R)分布(地盤A)

##### (3) 地盤 B (粘土層：構造高位、過圧密) の挙動

図7～図10に地盤Bの初期状態(改良前)と拡径開始から7.2分後(砂杭打設中)、14.4分後(砂杭打設終了時)、643日後(圧密終了時：改良後)における地盤内の過剰間隙水圧分布、間隙比変化分布、過圧密比(1/R)分布、構造(1/R\*)の分布を示す。

① 砂杭打設中（14.4 分後まで）の挙動 過剰間隙水圧（図 7）、間隙比変化（図 8）は地盤 A の場合と同様の挙動を示す。強制変位を与えている拵径部分では過圧密が一旦解消するが、それより下に位置する拵径済みの部分では、地盤 A の場合と同様にケーシングパイプの引抜きに伴う「除荷」により過圧密比が増加する（図 9）。また、砂杭円筒拵径により粘土層の構造は低位化し、自然堆積粘土地盤に「乱れ」が生じていることが分かる（図 10）。しかし、粘土の低透水性のために構造の低位化に伴う体積圧縮がすぐには起きず、構造が低位な地盤 A に比べて大きな過剰間隙水圧が発生する。

② 砂杭打設後の放置過程（14.4 分以後）の挙動 粘土層内に発生した過剰間隙水圧が消散して圧密が進行し、粘土層全体で間隙比が減少するが、構造の低位化に伴う体積圧縮が上乘せられるので、地盤 B では地盤 A に比べて粘土層での間隙比変化が大きい（図 8）。また過圧密も解消して粘土層全体が正規圧密粘土化している（図 9）。

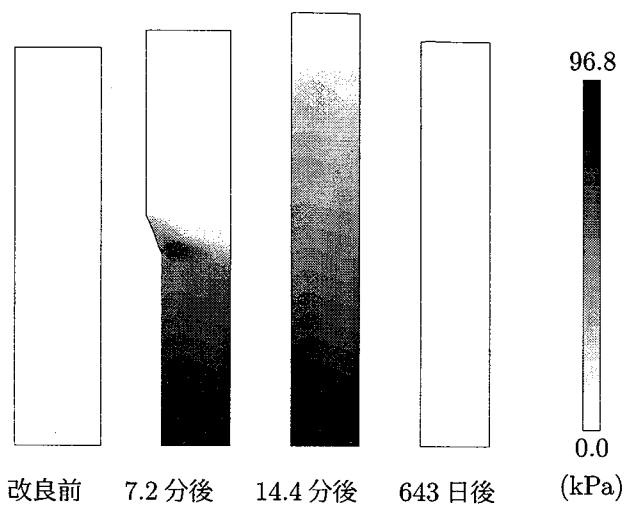


図 7 過剰間隙水圧分布（地盤 B）

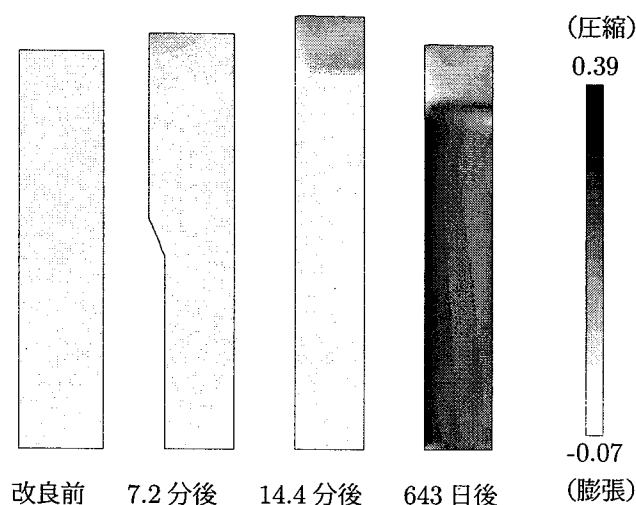


図 8 間隙比変化分布（地盤 B）

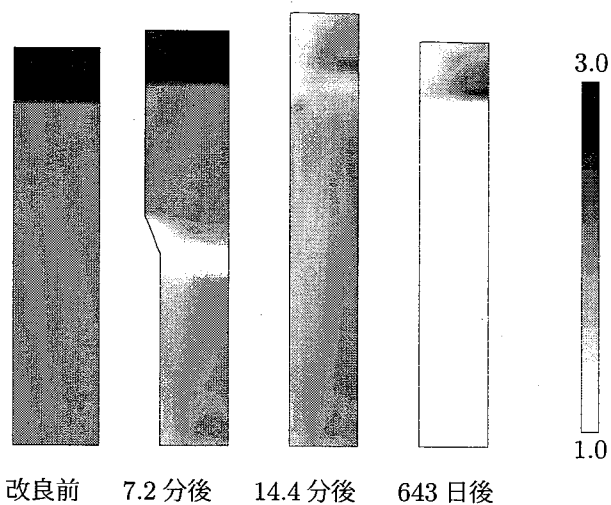


図 9 過圧密比 (1/R) 分布（地盤 B）

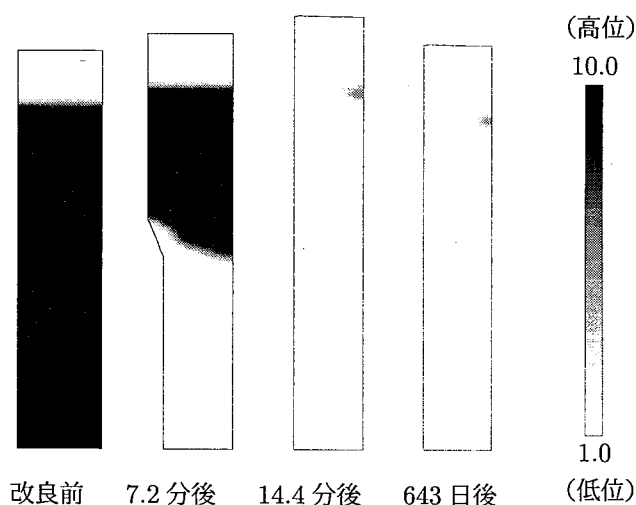


図 10 構造 (1/R\*) の分布（地盤 B）

### 3.2 砂杭円筒拵径による改良効果

砂杭の円筒拵径によって乱された杭周の自然堆積粘土地盤の改良効果を調べるため、杭間中央部、地盤の深さ中央部に位置する粘土要素（図 2 中の○印を付けた要素）の改良前後の挙動に着目し、地盤内と同一の状態では非排水せん断応答ならびに一次元圧縮応答を調べた。

#### (1) 非排水せん断応答

図 11、図 12 はそれぞれ地盤 A、地盤 B の改良前後の非排水せん断応答を示す。地盤 A では砂杭円筒拵径によって強度が増加している。地盤 B では改良前は非排水せん断で荷重がピークを示した後に軟化して残留状態に至る挙動を示すが、改良後はピーク強度が小さくなる一方残留強度が大きくなる。

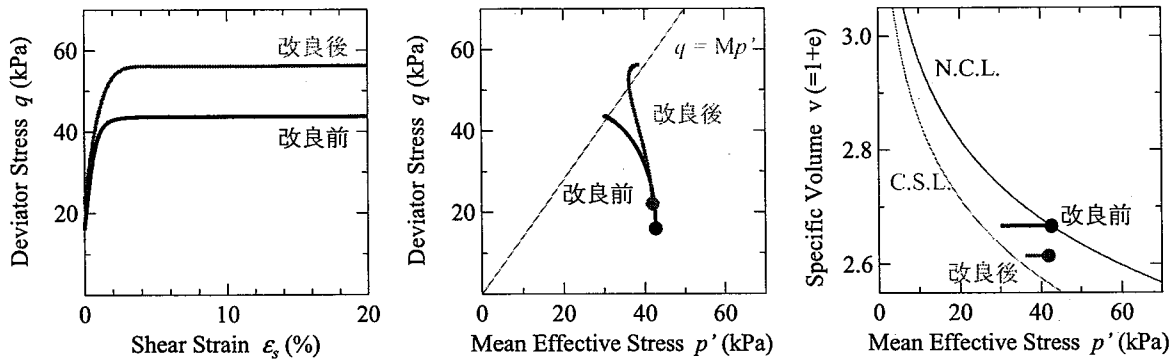


図 11 非排水せん断応答 (地盤 A)

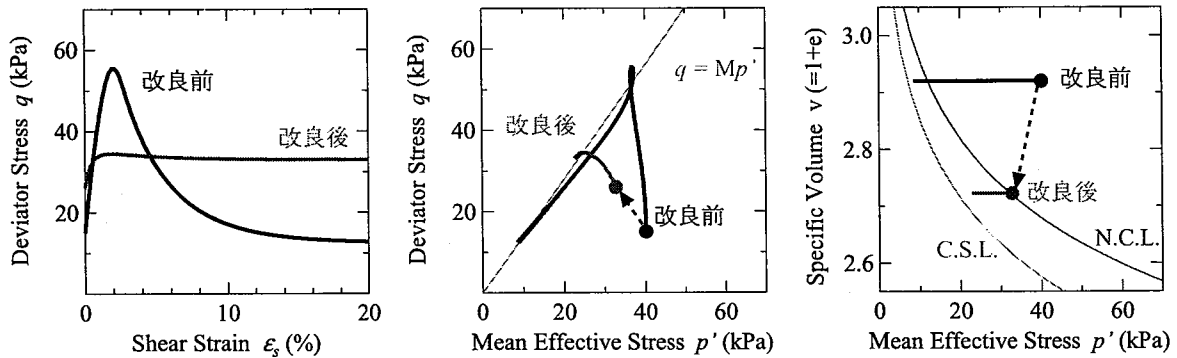


図 12 非排水せん断応答 (地盤 B)

## (2) 一次元圧縮応答

図 13、14 はそれぞれ地盤 A、地盤 B の同じ粘土要素の一次元圧縮応答を示す。地盤 B では、粘土要素の応力状態が図中に示す応力レベルまで増加するような上載荷重が地盤に作用する場合、改良前の地盤では大沈下が生じるが、改良後の地盤では砂杭円筒拡径によって自然堆積粘土の構造が低位化してすでに大圧縮しているため、大沈下が生じない。

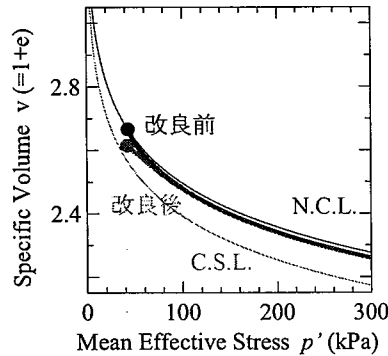


図 13 一次元圧縮応答 (地盤 A)

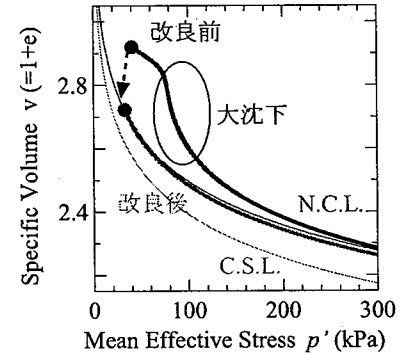


図 14 一次元圧縮応答 (地盤 B)

## 4 おわりに

砂杭打設過程を考慮した最も簡単な境界条件を設定して、砂杭打設中および打設後における杭周の自然堆積粘土地盤の挙動と改良効果を調べた。砂杭円筒拡径によって自然堆積粘土 (の骨格構造) が乱され、間隙比が減少したにもかかわらず粘土のピーク強度から算定される地盤の強度は低下する場合があることが分かった (図 12)。これは、端的に言えば、SCP 打設によって自然堆積粘土が乱される過程を示している。このような乱れは自然堆積で形成された海底斜面に SCP を打設したところ、斜面崩壊を来した事例を説明する一つの重要な要因と考えられる。その一方で、SCP により事前に乱されてしまった自然堆積粘土は、高残留強度や低圧縮特性という元の地盤より好ましい特性を示すことにも注目される。

## 参考文献

- 1) 三笠 (1964): 土の工学的性質の分類表とその意義, 土と基礎, 12(4), pp.14-24.
- 2) Asaoka et al.(2002): An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, S & F, 42(5), pp.47-57.
- 3) Asaoka et al.(1994): Soil-water coupled behaviour of saturated clay near/at critical state, S & F, 34(1), pp.91-106.
- 4) 野田ら (2001): 砂杭造成によるゆるい砂質地盤の締固め効果に関する水～土連成解析, S & F, 41(4), pp.113-123.