

東京湾横断道路川崎人工島内部掘削時 におけるSCP改良地盤調査報告

小林 肇¹・古郷 誠²・鈴木健一³・酒井成之⁴

¹正会員 日本道路公団 東京第二管理局 次長 (元東京湾横断道路 (株))

²日本道路公団 四国支店 技術部長 (元東京湾横断道路 (株))

³正会員 鹿島建設 (株) 土木設計本部 設計長

⁴不動建設 (株) ジオ・エンジニアリング事業本部 第一研究室長

東京湾横断道路川崎人工島における連続地中壁内部掘削に伴い、海上サンドコンパクションパイル工法による改良地盤をTP-28.0mからTP-55.0mまで掘削、調査する機会を得た。本報告は改良地盤の各深度における砂杭施工後約4年経過時の砂杭の材質、砂杭間粘性土の土質特性について述べたものである。

調査結果から、サンドコンパクションパイル施工船により海底地盤中に造成された砂杭は材質的にも、形状的にも良好であり、また、砂杭間粘性土の強度増加していることが確認された。

Key Words :soil improvement,sand compaction pile,off shore manmade island,site investigation

1. はじめに

東京湾横断道路は、神奈川県川崎と千葉県木更津とを結ぶ約15kmの道路である (図-1、図-2)¹⁾。

川崎側約10kmはシールドトンネル、木更津側約5kmは橋梁で、トンネル区間の中央部には川崎人工島が、トンネルと橋梁の接続部には木更津人工島がそれぞれ設けられている。

川崎人工島は、川崎側の取付部から沖合約5km、水深28mの海域に構築される直径98mのRC構造の人工島本体と外径約200mのジャケット式鋼製護岸からなる構造物式人工島である。この人工島は、工事中においてはシールドトンネルの発進立坑として使用され、道路完成後はトンネル換気の給排気口として用いられるほか、火災時の消火用水槽、トンネル湧水および路面排水処理設備、電気室等の設備が設置される²⁾。

建設地点の地盤は、海底面下約27m厚さで軟弱な沖積粘性土が堆積しており、川崎人工島の施工時および完成後の安定を確保するためにサンドコンパクションパイル (以下SCPと記述) 工法、深層混合処理 (以下DMMと記述) 工法による地盤改良が実施された。

本報告は、川崎人工島中央部の内部掘削³⁾に伴い、海底地盤中に打設されたSCPの各深度における形

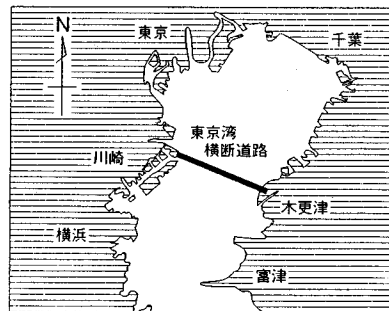


図-1 位置図

状およびパイル砂とパイル間粘性土の土性について調査、確認した結果について述べるものである。

2. 川崎人工島建設工事 (地盤改良) の概要

(1) 地質概要

川崎人工島付近の水深は28mであり、地質構成は図-3に示すとおりである。海底面から約27mは沖積層 (有楽町層: A層) であり、値が0の軟弱粘性土から成っている。その下の約35m (D₁ ~ D₂層) は洪積世の堆積層で、値が10~70の砂質土と

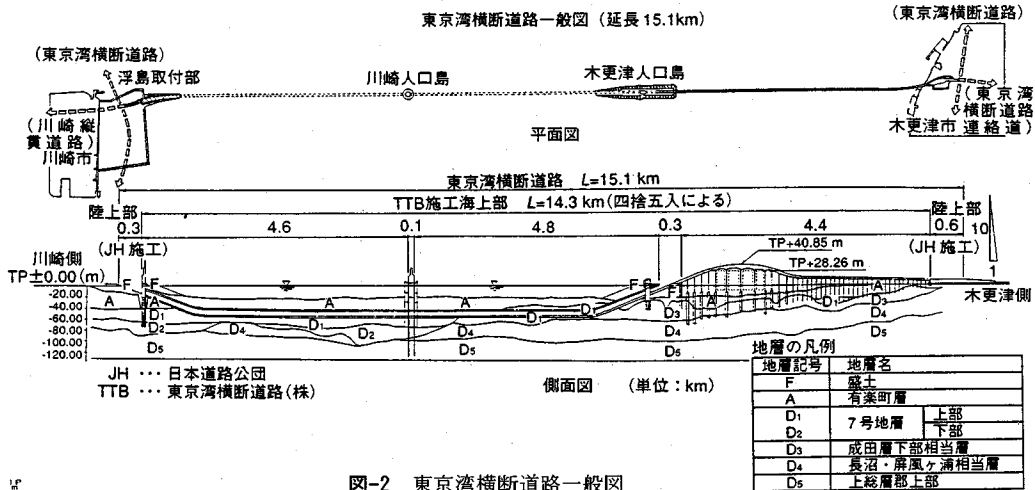


図-2 東京湾横断道路一般図

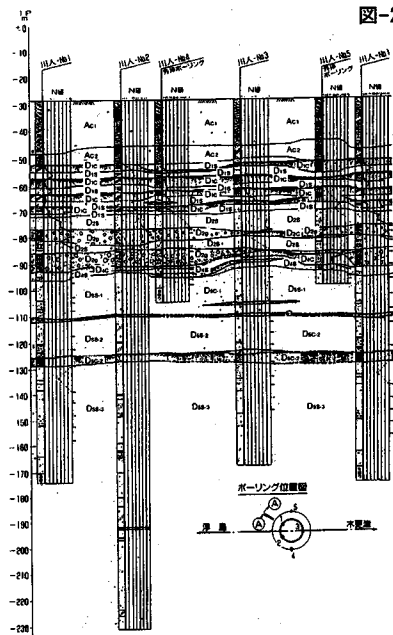


図-3 土質柱状図 (連壁ライン沿い A-A)

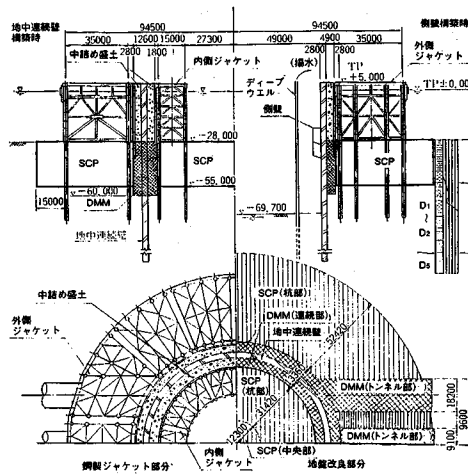


図-4 川崎人工島

粘性土の互層となっている。

TP-約90m以深(D₅層)は第三紀鮮新世末紀から第四紀洪積世前期にかけて堆積した地層であり、N値が70以上の極めて密に締まった砂で構造物の設計に当たって工学的基盤と考えられるものである⁴⁾。

(2) 地質改良工事の概要

人工島建設地点は海底から約27mの厚さで軟弱な粘性土が堆積している。このため、築島の安定と中詰盛土を支える鋼製ジャケット基礎杭の横抵抗確保、および地中連続壁施工中の孔壁安定を主目的として地盤改良を行った⁵⁾。地盤改良の概要を図-4に示す⁶⁾。

(3) SCP工の設計⁶⁾

SCP工法は外側・内側ジャケット部および人工島中央部に適用されている。ジャケット部は、ジャケットを固定する杭の横抵抗を確保して、杭が波や地震時等の水平力に抵抗できるとともに変位を極力抑えるために、砂杭径1.6m、改良率 $a_s = 78.5\%$ で改良した。改良の平面範囲は鋼製ジャケット基礎杭の横抵抗を確保するために、杭の $1/\beta$ の深さからの受働崩壊線が海底面と交わるところまでとし、深さは図-4に示すように $N=0$ の区域を改良することとして洪積砂層の天端レベルであるTP-55mまでとした。

人工島中央部は本体施工時に掘削撤去する部分であることから、内部掘削時の施工機械のトラフィカ

表-1 SCPの仕様と数量

改良仕様	パイルピッチ	打設仕様
Aタイプ 改良率 $A_s=78.5\%$ 改良杭径 $\phi 1,600\text{mm}$ 改良本数 5,231本		
Bタイプ 改良率 $A_s=30.1\%$ 改良杭径 $\phi 1,400\text{mm}$ 改良本数 47本		

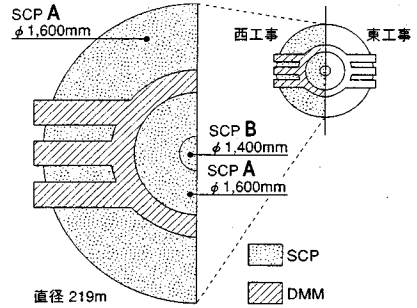


図-5 工事(改良)範囲

表-2 すべり安定の設計に用いる算定式

改良率	単位面積当りのせん断抵抗力	応力分担比 m	砂杭の内部摩擦角 $\phi_s(^{\circ})$
$a_s \leq 40\%$	$\tau = (1-a_s) \cdot (c_u + \Delta c) + (\gamma'_s \cdot z + \mu_s \cdot \sigma_z) \cdot a_s \cdot \tan \phi_s \cdot \cos^2 \theta$	3	30
$40\% < a_s < 70\%$	$\Delta c = c/p \cdot \mu_c \cdot \sigma_z \cdot U$ (1)	2	30
$a_s \geq 70\%$	$\tau = (1-a_s) \cdot c_u + (\gamma'_m \cdot z + \sigma_z) \cdot \mu_s \cdot a_s \cdot \tan \phi_s \cdot \cos^2 \theta$ (2)	1	35

ここに、 τ : 改良地盤のせん断抵抗力 γ'_m : 改良地盤の平均水中単位体積重量 U : 圧密度
 c_u : 粘性土の粘着力 $\mu_s \cdot \mu_c$: 応力集中係数 ϕ_s : 砂杭の内部摩擦角
 c/p : 粘着力増加係数 a_s : 改良率 θ : すべり面の水平面となす角
 γ'_s : 砂の水中単位体積重量 σ_z : 载荷による増加応力

ビリティを確保するために砂杭径 1.4m, 改良率 $a_s=30.1\%$ の仕様で改良した。

なお、SCPは砂杭中心位置(砂杭芯)で標準貫入試験を行い、平均N値15以上を確保した。

a) 横方向地盤反力係数

SCP改良地盤中に打設された杭が水平力を受ける時には砂杭による改良効果が期待できると考えられる。しかし、改良率が低いと、砂杭が粘性土中に独立して存在することになるので、荷重载荷時における砂杭による圧密促進効果に起因する砂杭周辺粘性土の強度増加以上の効果を期待するのは難しい。

一方、高改良率で砂杭相互が接している状態($a_s=78.5\%$)の地盤は、ほぼ砂質土地盤と同様であるとみなされるので、SCP改良による水平支持力の増加が見込まれる。

改良地盤の K_0 値(基準 K 値)は次式⁷⁾で算定することとした。次式は上載荷重がない状態での改良地盤の K 値の実測に基づくものである。

$$K_0 = k_o \cdot D^{-1/4} \quad (3)$$

- $k_o = (1 - a_s) \cdot k_{oc} + a_s \cdot k_{os}$
- k_{oc} : 原地盤部の比 K 値
 $k_{oc} = 5.1 \cdot q_u \text{ (kgf/cm}^3\text{)}$
- k_{os} : SCP部の比 K 値 (kgf/cm³)
 $k_{os} = 6.6 \text{ kgf/cm}^3$
- a_s : SCP部の改良率
- q_u : 一軸圧縮強さ (kgf/cm²)

b) すべり安定

川崎人工島のSCP改良は、前述したように鋼製ジャケット基礎杭の横抵抗増加を目的としているが、浮島取付部および木更津人工島では護岸捨石盛土部のすべり安定対策としてSCP工法が採用されている。

安定計算においてSCP改良地盤は複合地盤として取扱った。複合地盤のせん断抵抗力は表-2に示すように、改良率毎にその算定方法、応力分担比 m 、砂杭の内部摩擦角 ϕ_s を設定して、所定の安全率(常時: $F_s > 1.2$, 地震時: $F_s > 1.0$)を確保する断面とした。

(4) SCP工の施工

SCP工法による砂杭造成の方法には「打戻し締固め方式」と「先端振動締固め方式」とがあり⁷⁾、川崎人工島のSCP工事では両工法が採用されたが、今回の地盤調査を実施した西工事域は、前者の方法で行われた。西工事域の地盤改良範囲とSCPの仕様を図-5および表-1に示す。

工事は大型SCP船(3~6連装)4隻にて昼夜連続で4ヶ月かけて行われ、千葉県浅間山の山砂(均等係数2.0, シルト以下の細粒分5%以下)を砂杭材料として使用した。

砂杭の打設に当たっては、SCP船の位置決め「光波による自動位置決め装置」を、潮位の測定には「潮位情報無線電送装置」をそれぞれ使用した。

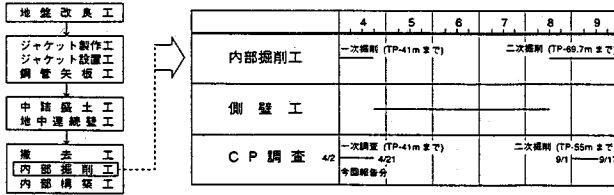


図-6 調査工程表

表-3 調査項目と調査方法

調査目的	調査項目	調査方法
砂杭の形状および改良状況	砂杭径、砂杭形状 改良率 砂杭下端形状等	メジャーによる実測、 基本調査範囲(4.8m×4.8m)の スケッチおよび写真撮影
砂杭の物理特性	湿潤単位体積重量 含水比 粒度分布	簡易法による不攪乱試料の採取、 室内土質試験(単位体積重量試 験、含水比試験、粒度試験) 試料採取は砂杭芯、砂杭外周部
砂杭間粘性土の物理、力学特性	湿潤単位体積重量 含水比 一軸圧縮強度 コーン試験値	簡易法による不攪乱試料の採取、 室内土質試験(単位体積重量試 験、含水比試験、粒度試験、一 軸圧縮試験) ポータブルコーン試験による現 位置強度試験

*簡易法による試料採取とは、シンウォールサンプリャーチューブ(φ75mm)をサンプリャー長L=150mmに加工したものを人力にて静的に対象土中へ貫入し、不攪乱試料を採取する方法のことである。

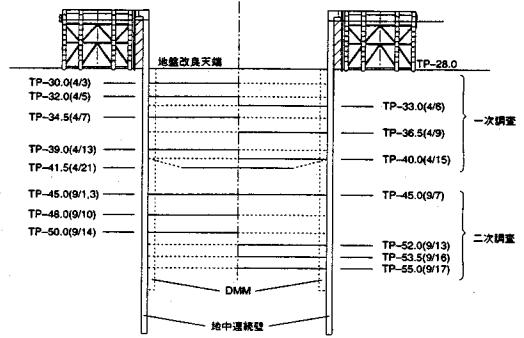
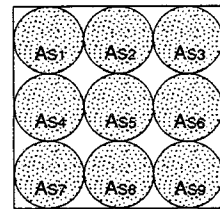


図-7 調査実施深度および実施日



調査対象面積：Ao

図-8 砂の出現率算出模式

前者は、工事海域の6基の測量台上の反射鏡とSCP船上の自動基準光波距離計とで測距したデータをパソコンで演算処理しディスプレイ表示するものであり、後者は、測量台に設置した潮位計と送信装置およびSCP船上の受信装置とにより潮位データを送信・受信するものである。

3. 川崎人工島内部掘削時におけるSCP改良地盤調査

(1) 調査目的

従来、海上SCP工法による改良地盤は、海底面下であるので、その出来形や状態が目視されることがなかった。しかし、東京湾横断道路川崎人工島工事の内部掘削施工に伴い、海上施工されたSCP改良地盤を直接的に観測する機会を得て、砂杭の出来形形状や配置の観測、打設された砂杭や砂杭間粘性土の物理、力学特性の確認を目的とする調査を実施した。

(2) 調査時期

川崎人工島工事では、図-6に示すように地盤改良工(SCP工、DMM工)を行った後、ジャケツトを製作、設置、鋼管矢板を打設、内側、外側ジャケツト間に中詰盛土を施工し、地中連続壁を構築し

て、その後、内側ジャケツトを撤去しながら連続壁の内側を海底面下約40mまで掘削し、本体構造物を構築する。

SCPは平成元年8月から12月に打設されており、内部掘削に伴う調査(一次調査：平成5年4月、二次調査：平成5年9月)は打設から約4年が経過して実施された。この間、内部掘削部のSCP改良地盤には盛土等の荷重は何ら作用していない。

(3) 調査の内容

a) 調査位置

各深度ごとの調査位置は同一地点で実施することが望ましいが、内部掘削工事の進捗状況から定位置での調査が事実上不可能であったので、調査時点で調査可能な地点において隣接するAタイプ9本(3本×3本)のエリアを基本調査面積として調査した。一次調査および二次調査の調査深度と調査日を図-7に示す。

b) 調査項目と調査方法

各掘削深度ごとに砂杭の形状を確認し、求められる面積比率としての砂の出現率と砂杭試料による砂杭の物理特性、砂杭間粘性土試料による改良地盤内粘性土の物理、力学特性の確認、および砂杭下端形状の調査を行った。また、砂杭間粘性土の強度の変化にも注目して、ポータブルコーン試験による原位置強度試験を各掘削深度で実施した。調査項目と調

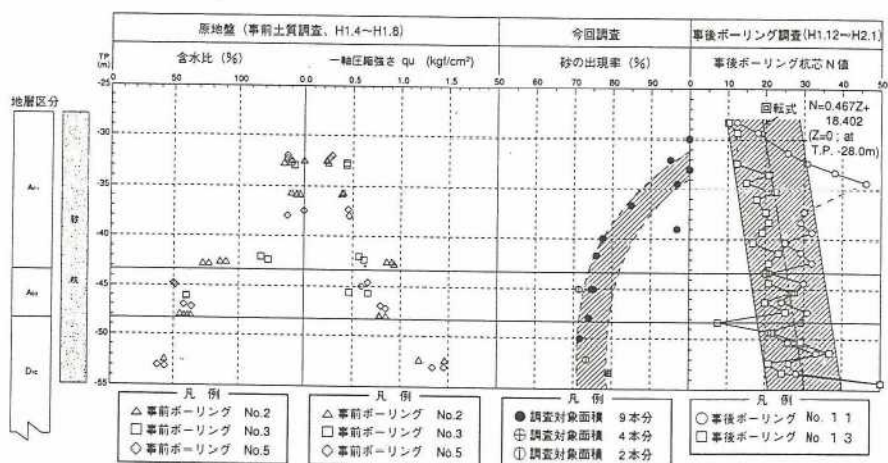
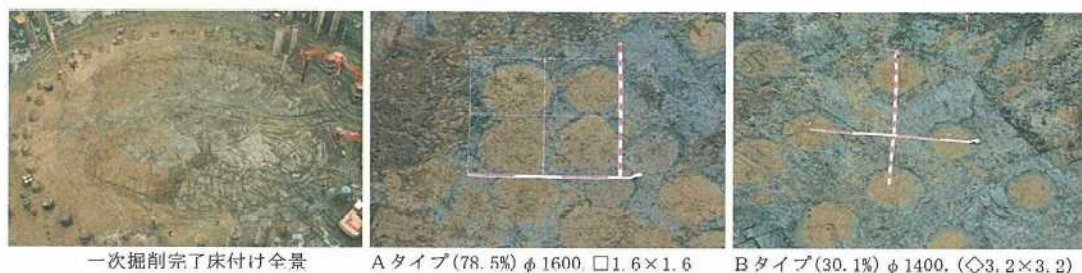


図-9 原地盤の土性と砂の出現率調査結果



一次掘削完了床付け全景

Aタイプ(78.5%) φ 1600. □ 1.6×1.6

Bタイプ(30.1%) φ 1400. (◇)3.2×3.2)

写真-1 第一次床付け(TP-41.5m)

査方法を整理して表-3 に示す。

前述した「砂の出現率」とは調査対象面積内に占める砂の面積比率を表す数値であり、SCP工の設計に使用する改良率 a_s に対応する値である。考え方の模式図を図-8 に、算出方法を(4)式に示す。

$$\text{砂の出現率} = \frac{\text{砂が占める面積}}{\text{調査対象面積}} = \frac{\sum A_{sn}}{A_0} \quad (4)$$

4. 調査結果と考察

(1) 砂の出現率

各掘削深度における調査結果から、砂の出現率と改良深度の関係を整理して図-9 に示す。当図には、SCP改良前の自然含水比 (ω_n)、一軸圧縮強さ (q_u) およびSCP施工時に調査された砂杭芯標準貫入試験値 (N_p) も合わせて示してある。

当図から、砂の出現率はTP-30m付近~TP-40m付近で85%以上、TP-40m付近~TP-48m付近で75%~80%程度、TP-48m付近~TP-55m付近で72%~75%

程度である。この結果は同図中に示す原地盤の土性に関係していると考えられ、改良対象の沖積粘性土の原地盤土性は、 A_{c1} 層 ($\omega_n = 80 \sim 150\%$, $q_u = 0.2 \sim 0.6 \text{ kgf/cm}^2$)、 A_{c2} 層 ($\omega_n = 40 \sim 50\%$, $q_u = 1.2 \sim 1.5 \text{ kgf/cm}^2$) であった。

即ち、有効土被り荷重が小さく、含水比が高く、一軸圧縮強さの低い土層においては、砂の出現率が設計値(置換率 $a_s = 78.5\%$)より大きく、含水比が $\omega_n = 60 \sim 120\%$ 、一軸圧縮強さが $q_u = 0.3 \sim 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ 程度の土層においてはほぼ設計値の砂の出現率を、深度が深く含水比が $\omega_n < 50\%$ と低く、一軸圧縮強さが $q_u > 1.2 \text{ kgf/cm}^2$ と高い土層においては、砂杭周辺の有効土被り圧および粘着力に起因する砂杭造成に対する抵抗力の大きさにより砂の出現率が若干設計値を下回る結果となっている。

一方、SCP施工後に行われた事後土質調査による砂杭芯N値は、 $N_p = 0.47Z + 18.4$ で一回帰されるように深度方向に増加している。

以上から、砂の出現率と砂杭の強度 (N_p 値) は、砂杭周辺の有効土被り圧および粘着力等の拘束条件

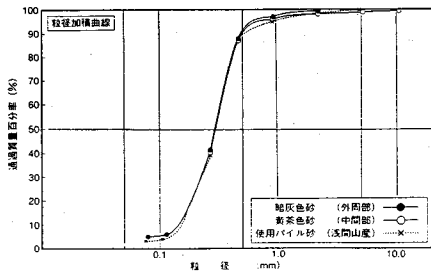


図-10 採取試料(砂)の粒径加積曲線

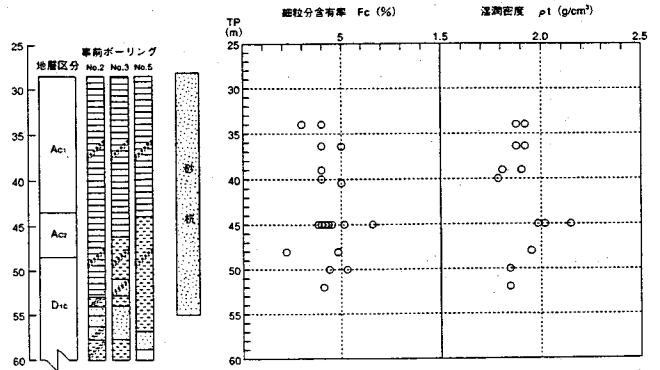


図-11 杭砂の物理試験結果

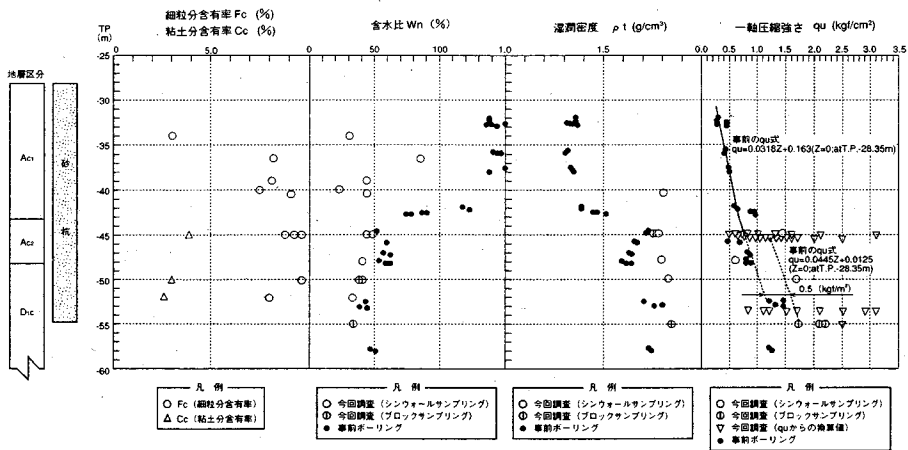


図-12 杭間粘性土の物理・強度試験結果

により相対的に決定されていると判断される。

(2) 砂杭の土質特性

今回の調査で採取された砂杭試料を用いて室内土質試験を行った。図-10 に粒度分布を、図-11 にシルト分以下の細粒分含有量 (F_c)、湿潤単位体積重量 (ρ_t) の深度分布を示す。

砂杭施工後4年程度経過しているが、図-10 から明らかなように砂杭に含有される細粒分含有量は5%程度以下であり、砂杭中央部も砂杭外周部も施工時に使用した砂杭材の粒度分布と変わりなく、シルト分以下の細粒分の増加はなく、砂杭への周辺粘性土の混入、侵入は認められない。

砂杭の湿潤単位体積重量も深度方向にほぼ一定で $\gamma_t = 1.8 \sim 2.0 \text{ tf/m}^3$ 程度であり、設計時に考えられていた $\gamma_t = 1.9 \text{ tf/m}^3$ とほぼ同等の値となっている。

(3) 砂杭間粘性土の土質特性

砂杭間粘性土の土性および物理特性を調査するた

めに、シンウォールまたはブロックサンプリングにより試料を採取して含水比試験、粒度試験、単位体積重量試験 (二次調査のみ) を行った。また、二次調査では力学特性を調査するために、ポータブルコーンによる原位置コーン試験、および採取した不攪乱試料を用いた一軸圧縮試験を行った。

図-12 に各土性値の深度分布を示す。なお、コーン試験値は、同地点でのコーン値 (q_c) と一軸圧縮試験値 (q_u) から両者の関係を求めて、 $q_c = 7q_u$ として、q_u 値に換算している。

a) 砂杭間粘性土の物理特性

砂杭間粘性土の細粒分含有量は $F_c = 80 \sim 95\%$ と原地盤粘性土と同じである。

含水比は、A_{c1}層で原地盤 $\omega_{n0} = 80 \sim 150\%$ に対して、今回調査では $\omega_n = 40 \sim 50\%$ 程度、A_{c2}層で $\omega_{n0} = 50 \sim 70\%$ に対して $\omega_n = 40 \sim 50\%$ 程度、D_{1c}層で $\omega_{n0} = 45\%$ 程度が $\omega_n = 35\%$ 程度に低下している。即ち、砂杭間粘性土の含水比は原地盤の土層区分にかかわらず、 $\omega_n = 35 \sim 50\%$ に減少して、ほぼ均一化した値となっている。



写真-2 SCP (B/A') 下端; TP-55m付近

湿潤単位体積重量は、原地盤において、 A_{c1} 層で $\gamma_{t0} = 1.3 \sim 1.5 \text{ tf/m}^3$ 、 A_{c2} 層で $\gamma_{t0} = 1.6 \sim 1.7 \text{ tf/m}^3$ 、 D_{1c} 層で $\gamma_{t0} = 1.7 \sim 1.8 \text{ tf/m}^3$ 程度であったものが、今回の調査の砂杭間粘性土では、 $\gamma_t = 1.75 \sim 1.85 \text{ tf/m}^3$ 程度に増加し、含水比の結果と同様に土層にかかわらず均一化した値となっている。

b) 砂杭間粘性土の力学特性

原地盤粘性土と今回調査による砂杭間粘性土の一軸圧縮強さを比較すると、原地盤のデータにバラツキはあるものの砂杭間粘性土の一軸圧縮強さは原地盤に比べて $\Delta q_u = 0.5 \text{ kgf/cm}^2$ 程度の増加が認められる。今回の調査位置の改良地盤には図-7 に示すように粘着力を増加させるような盛土等の荷重は作用していない。今回確認された一軸圧縮強さ増加の要因としては、SCP施工時の砂杭造成応力による強度増加、砂杭が打設されたことにより改良地盤の有効土被り荷重が増加し、砂杭施工から約4年経過したことによる圧密強度増加、等の要因が挙げられるが、今後研究すべき課題と考えられる。

上述した砂杭間粘性土の含水比の低下、一軸圧縮強さの増加が地盤掘削時の施工を容易とすることは今回の掘削工事において明らかであった。

(4) 砂杭下端の形状

内部掘削下端はTP-69.7mであり、SCP下端はTP-55.0mであるので、砂杭下端部の形状が観測された。

砂杭下端部の形状は写真-2 に示すとおりである。砂杭の形状はその下端部においてもほぼ円筒形を呈しており、径の過大な太りや先細りの形状はしていない。当工事における砂杭は洪積粘性土に達する深度まで造成されており、その下端部は写真からわか

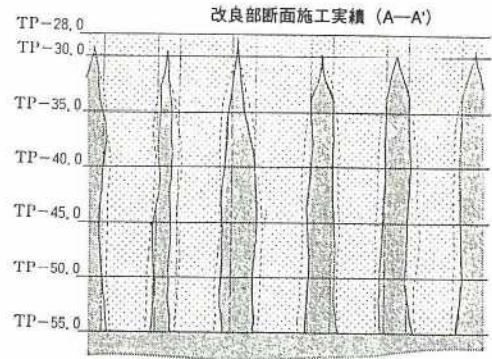
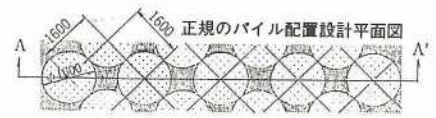


図-13 改良地盤のイメージ図

るように砂杭周辺粘性土が砂杭造成応力により圧縮されている状況が見られる。また、砂杭下端部においても周辺粘性土の混入は認められなかった。

以上、今回の調査結果から想定される砂杭の深度方向の形状イメージを図-13 に示す⁸⁾。

5. まとめ

本報告は、東京湾横断道路川崎人工島工事における連続地中壁内部掘削に伴い、海上SCP工法による改良地盤の砂杭の形状、砂杭の置換率（出現率）、砂杭施工後4年程度を経た砂杭の材質、砂杭間粘性土の土質特性を原位置調査したものである。

今回の調査結果に基づき、海上施工されたSCP工法の改良地盤の品質について以下にまとめる。

①砂の出現率は、設計置換率 $a_s = 78.5\%$ に対して一軸圧縮強さ $q_u = 0.3 \sim 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ 程度の地盤でほぼ設計置換率を満足する。この面積比率としての砂の出現率は砂杭周辺の有効土被り圧および粘着力に起因する砂杭造成に対する抵抗力により影響され、抵抗力が小さい場合には出現率が大きく、洪積粘性土のように大きな場合には若干小さくなる傾向が見られた。一方、砂杭芯N値は深度方向に増加していることが地盤改良後の土質調査で確認されている。

この砂の出現率と砂杭の強度の関係は深度方向に砂杭造成抵抗力が増加する地盤中に一定の施工サイクルに伴う砂杭造成荷重が作用した結果と判断される。

②砂杭の形状は、各掘削深度における調査の結果、円形に砂杭が造成されていることがわかった。

③確認された砂杭の粒度分布は、細粒分含有量F。≤5%程度で、砂杭への周辺粘性土からの細粒分の混入、侵入は認められない。また、砂杭の湿潤単位体積重量は $\gamma_t = 1.80 \sim 2.00 \text{ tf/m}^3$ 程度で、砂杭に使用された材料の締固め特性から判断して、締固められた砂杭と判断される。

④調査は砂杭施工後4年程度経過した後に実施しているが、その間、何ら圧密強度増加を生じさせるような新規の増加荷重はSCP改良地盤に作用していない。しかし、今回の調査における砂杭間粘性土は、含水比が低下し、湿潤単位体積重量は増加し、一軸圧縮強さは原地盤強度に比較して $\Delta q_u = 0.5 \text{ kgf/cm}^2$ 程度増加している。

このように砂杭の造成に伴い砂杭間粘性土の強度が増加することは、既に指摘されていたことであるが、今回調査で定量的に確認された。

⑤砂杭下端部は、ほぼ円筒形の形状をしており、径の過大な太りや先細りの形状は見られなかった。

また、原地盤粘性土の砂杭部への混入も認められなかった。

参考文献

- 1) 篠原洋司, 下村真弘: 東京湾横断道路建設事業の概要, 橋梁と基礎, pp.87-90, 1990.8.
- 2) 藤森茂登, 鈴木健一: 川崎人工島ジャケット式護岸の施工/東京湾横断道路の施工技术(その1), 土木学会土木施工研究委員会, pp.107-118, 1993.4.
- 3) 佐野幸洋, 木村栄一: 大直径・大深度地中連続壁の設計・施工, 基礎工, pp.21-31, 1993.1.
- 4) 前田依彦, 篠原洋司: 東京湾横断道路建設における土質工学諸問題について, 土木学会論文集, No. 400/III-10, pp.13-28, 1988.12.
- 5) 藤森茂登: 川崎人工島のジャケット式鋼製護岸の施工, 建設の機械化, pp.3-9, 1992.7.
- 6) 川瀬泰裕, 橋本文男: 高密度サンドコンパクションパイル工法, 基礎工, pp.56-61, 1993.1.
- 7) 地盤工学会編: 軟弱地盤対策工法—調査・設計から施工まで—, 第II編第3章, pp.119-151, 1988.
- 8) 飯田裕, 吉田好孝, 今井孝治: 東京湾横断道路における地盤改良工法, 土木技術49巻8号, pp.46-55, 1994.8.

(1995. 11. 2. 受付)

ESTIMATION OF THE CLAY GROUND IMPROVED BY SAND COMPACTION PILES AT KAWASAKI MAN-MADE ISLAND

Hajime KOBAYASHI, Makoto KOGO, Kenichi SUZUKI and Shigeyuki SAKAI

Taking advantage of an opportunity that the inner part of slurry wall at Kawasaki man-made island for Trans Tokyo Bay Highway was being excavated, we could estimate the effect of soil improvement work done by the offshore sand compaction piles for the said excavation area was as deep as from TP-28.0 m to TP-55.0 m. We investigated on the quality of sand piles and characteristics of clay in-between the sand piles at each depth after a lapse of four years. It resulted in our confirmation that sand piles installed into the undersea ground has kept good condition in its quality and appearance, and the strength of clay in-between piles increased.