

羽田空港再拡張工事の接続部護岸における 海上サンドコンパクションパイルの施工

田中秀夫¹・佐野隆行¹・新原雄二¹・野口孝俊²・篠原秀文³

¹正会員 鹿島建設(株) 東京土木支店 羽田再拡張接続部工事事務所 (〒107-8477 東京都港区元赤坂1-3-8)

²正会員 国土交通省 関東地方整備局 東京空港整備事務所（〒144-0041 東京都大田区羽田空港3-5-7）

³国土交通省 関東地方整備局 東京空港整備事務所（〒144-0041 東京都大田区羽田空港3-5-7）

埋立・栈橋組合せ構造で建設される羽田空港D滑走路では、その接続部となる護岸には鋼管矢板井筒形式の護岸構造が採用されている。接続部護岸では、埋立部の圧密沈下等に伴う側方変位に対する水平抵抗力の確保を目的として軟弱粘性土地盤をサンドコンパクションパイル工法（SCP）により改良した。SCP工事では運用中の既存滑走路直下という制約条件下において急速かつ大量施工が求められたが、船舶の位置・高さをリアルタイムに監視できるシステム等の導入により無事完了したので、その施工実績について報告する。

キーワード：空港、地盤改良、サンドコンパクションパイル、作業船、制限表面、夜間施工

1. はじめに

国内空港ネットワークの基幹空港である羽田空港では、今後も増大が見込まれる航空需要に対応するため、現空港の沖合いに新たに4本目となる滑走路（以下、「D滑走路」という）を建設中である。D滑走路が建設される場所は多摩川河口域にあることから、多摩川の通水性を確保するため河口域内を栈橋構造とし、河口域外は関西国際空港や中部国際空港で実績のある埋立構造とする「埋立・栈橋組合せ構造」が採用された¹⁾。

埋立構造と栈橋構造という異種構造物を接続する埋立／栈橋接続部（以下、「接続部」）の護岸は、D滑走路島における最も重要な構造物の1つであり、超軟弱粘性土が厚く堆積した大水深（約18m）の海域に、海面からの護岸高さ14mという過去に例を見ない超高盛土の護岸構造である。接続部護岸では、埋立部の圧密沈下に伴って発生する側方移動や地震時の側方移動を抑制することが護岸構造として成立するための最重要課題であったことから、接続部護岸本体は高耐力継手²⁾を用いた鋼管矢板井筒構造とし、地盤の横抵抗を確保するため護岸前面の軟弱粘性土地盤をサンドコンパクションパイル工法（以下、SCP）により改良する鋼管矢板井筒護岸が採用された。

接続部護岸の SCP は、運用中の C 滑走路の制限表面直下での工事となるため、厳しい高さ制限が課され、SCP 船のような大型作業船による工事は夜間に

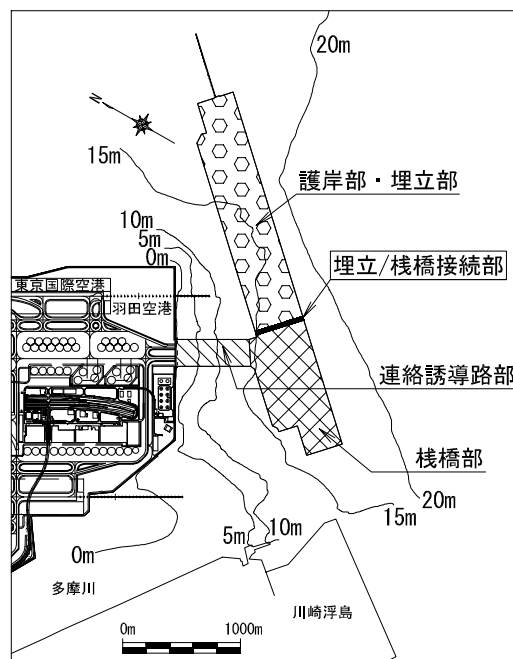


图-1 施工位置图

限定された。また、急速施工が求められる D 滑走路工事では同時に多数の作業船が稼動するため、作業船同士の輻輳が問題となった。本論文は、このような制約条件下における海上 SCP の大量急速施工のために導入されたシステムと、それを用いた施工実績について述べるとともに、SCP の品質・出来形管理の実績についても報告する。

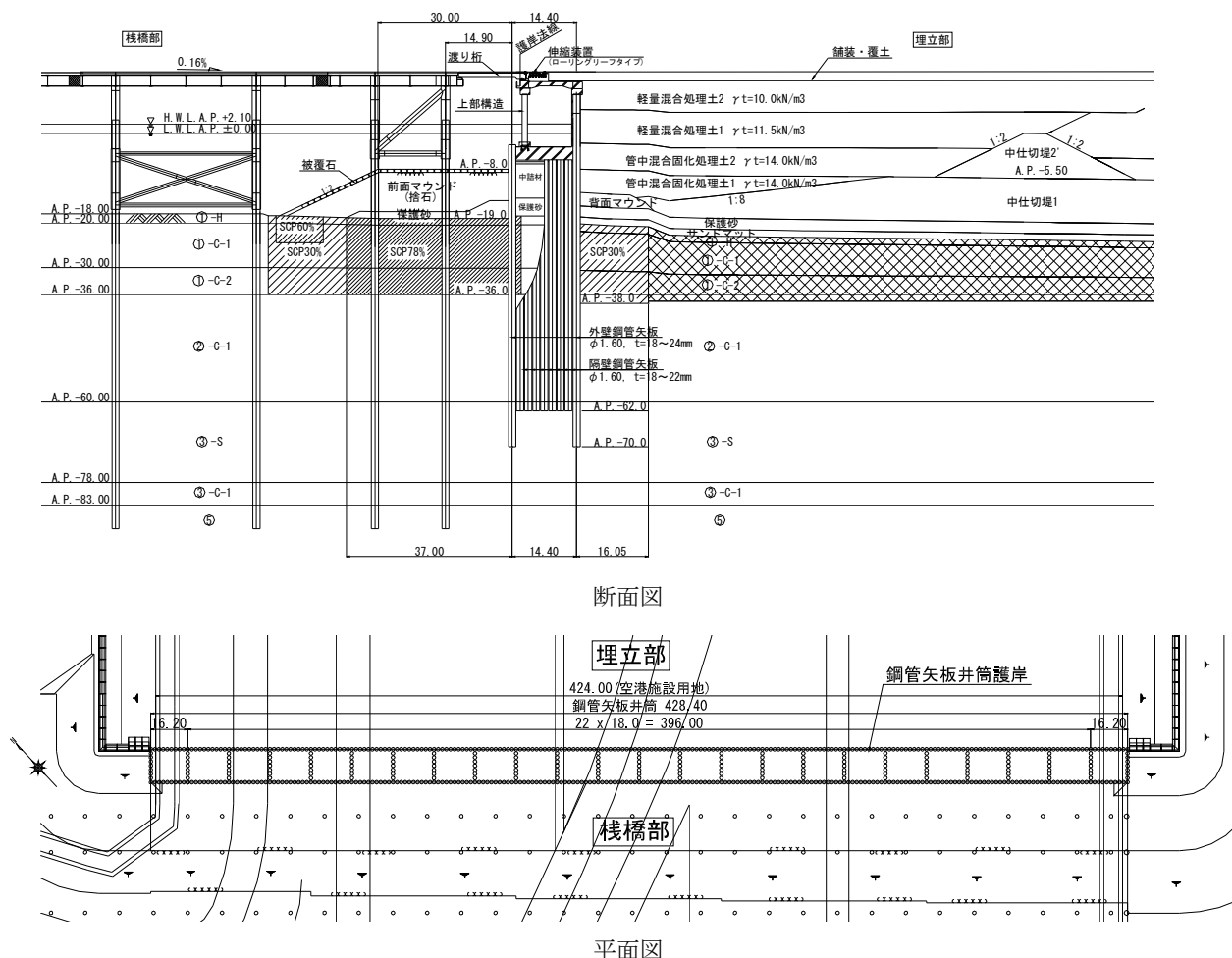


図-2 埋立／栈橋接続部の平面・断面図

2. 接続部護岸の構造とSCP工の概要

(1) 接続部護岸の概要

a) 護岸構造

鋼管矢板井筒は接続部護岸全長にわたって打設される2列の鋼管矢板φ1600（外壁部）と、それと直角に滑走路方向に打設される鋼管矢板φ1600（隔壁部）からなる24個の連続した矩形セルから形成される。隔壁部の鋼管矢板の継手にはせん断耐力の大きい高耐力継手を使用し²⁾、鋼管矢板の頂部を頂版で結合することにより、井筒としての剛性を高めている。鋼管矢板井筒護岸の前面（栈橋側）は、背面埋立荷重に伴う前面側への変形抑制を目的として、軟弱粘性土層を高置換SCPにより地盤改良し、押え盛土としての捨石マウンドを構築する。護岸背面（埋立側）については、埋立材として浚渫土を利用した管中混合固化処理土、軽量混合処理土を使用することにより圧密沈下の低減を図るとともに、低置換SCPによる地盤改良により地表面の段差対策が行われている。接続部護岸の断面図、平面図を図-2に示す。

接続部護岸の設計においては埋立施工に伴う護岸の側方変位、及び地震時の側方変位がクリティカルであり、これらの側方変位を抑えるために、鋼管矢板井筒の前面地盤を高置換SCPにより改良した。埋立施工時の側方変位については粘性土の圧密状態や地盤改良の効果、施工履歴の影響を評価可能な関口・太田モデル（修正カムクレイ型）による弾・粘塑性解析を行い³⁾、地震時の側方変位については有効応力法非線形動的解析（FLIP）を行い⁴⁾、その結果を基に高置換SCPの改良範囲が決定されている。

b) 地盤条件

接続部護岸の土層断面を図-3に、工学的地層区分を表-1に示す。D滑走路における工学的地層区分では、表層から順に①層、②層・③層・④層・⑤層の5層に分類される。このうち、①層は高含水比・高塑性指数の軟弱粘性土層で、いわゆる有楽町層に対応する。①層の下端はA.P. -36m付近でほぼ平坦に分布しており、高置換SCPは護岸の側方変位に対する横抵抗を確保することを目的として、この①層下端A.P. -36mまでを改良した。

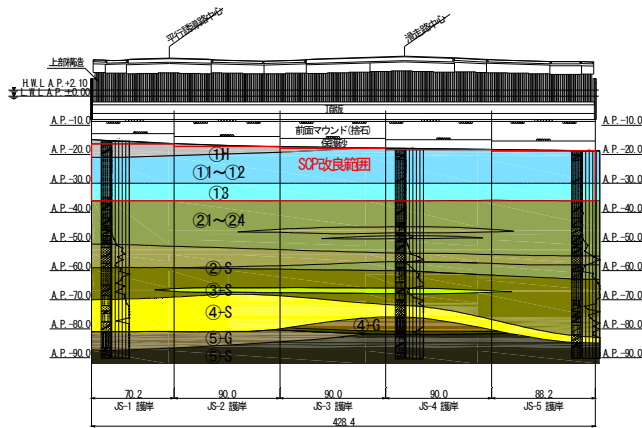


図-3 接続部の土層断面

表-1 D滑走路における工学的地層区分

大区分	小区分	土質	特徴
①	①-H	粘性土主体で、一部砂質土を挟在。	*粘性土を主体とし砂を挟む覆土。最上部層。
	①I~①J	粘性土主体。	*高含水比高塑性指数・間隙比が大き γ ($W_n > 100, I_p > 60, e > 3$)。 *単位体積重量は $\gamma_t = 13.5 \text{ kN/m}^3$ 程度。 *単位体積重量は $\gamma_t = 15.0 \text{ kN/m}^3$ 程度。
	①K	Ac1 (AP-20~30m)	
②	②I~②J	Ac1 (AP-30~36m)	
	②K	Ac2~Dcl層	
③	③I~③J	粘性土主体で、②層の下半分に一部砂質土挟在。	*①層と比べると粗粒で低塑性な粘性土。 *単位体積重量は $\gamma_t = 18.0 \text{ kN/m}^3$ 程度と粘性土としては大。
	③S	Ac2~Dcl層一部の砂質土部	*②層の下半分に位置する砂質土で、厚さは薄く互層状態。
④	④I~④J	互層の砂質土部	*N値50以上が比較的連続する砂質土。
	④S	工学基礎と見なせる可能性のある層(砂質土部)	*砂質土を主体とする層。 *N値は50以上あるが一部N値が低下。
⑤	⑤I~⑤J	砂質土主体。	*おおむね砂質土で構成、粘性土の層厚は、薄い。
	⑤S	工学基礎層	*N値が50以上の連続した層。

(2) 海上 SCP 工の概要

接続部護岸の SCP 改良範囲を図-4 に示す。改良率は、護岸変位を抑制する高置換改良部が 78%、また前面の捨石マウンドの法面の安定を確保する改良部と埋立部の傾斜堤護岸へのすりつけ部分となる接続部護岸の両端部については低置換の 30%とし、傾斜堤護岸の法先安定性確保のために 60%の改良を行った。接続部護岸の SCP 改良の施工数量を表-2 に示す。

3. 高さ制限下での SCP 施工

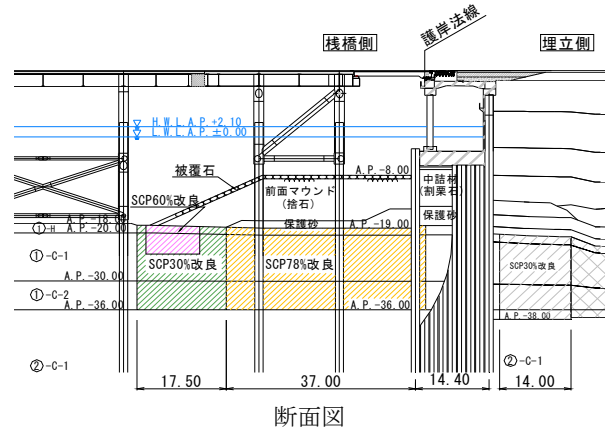
(1) 施工における制約条件

a) 制限表面（高さ制限）

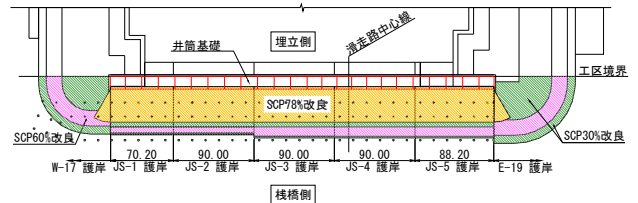
D滑走路工事エリアは、既設空港の A滑走路及び C滑走路から離発着する航空機の直下に位置するため、工事に際して厳しい制限表面(高さ制限)が設けられている。そのため、制限表面に抵触する高い作業船を使用する作業は滑走路の運用制限が行われる夜間(20:45~7:45)に限定される。

b) 作業船の輻輳

D滑走路工事では同時に多数の作業船が稼動するため、作業船同士が輻輳しアンカー等が干渉するため、施工上大きな制約を受けることになる。



断面図



平面図

図-4 接続部護岸の SCP 改良範囲

表-2 接続部護岸の SCP 施工数量

SCP 仕様	78%改良			60%改良			30%改良		
	杭長 (m)	本数 (本)	延長 (m)	杭長 (m)	本数 (本)	延長 (m)	杭長 (m)	本数 (本)	延長 (m)
W-17	-	-	-	8.0	141	1128.0	22.0	419	9,218.0
JS-1	20.0	51	1,020.0	6.0	48	288.0	19.6	92	1,803.2
	22.0	48	1,056.0	-	-	-	-	-	-
	19.6	652	12,779.2	-	-	-	-	-	-
JS-2	18.7	840	15,708.0	6.0	61	366.0	18.7	120	2,244.0
JS-3	18.1	840	15,204.0	6.0	90	540.0	18.1	150	2,715.0
JS-4	17.6	840	14,784.0	6.0	90	540.0	17.6	150	2,640.0
JS-5	17.2	820	14,104.0	6.0	87	522.0	17.2	145	2,494.0
	16.5	53	874.5	-	-	-	-	-	-
	22.5	50	1,125.0	-	-	-	-	-	-
E-19	-	-	-	8.0	188	1504.0	22.5	18	405.0
	-	-	-	-	-	-	24.5	536	13,132.0
合計		4,194	76,654.7		705	4888.0		1,630	34,651.2
本数合計	6,529 (本)								
延長合計	116,193.9 (m)								

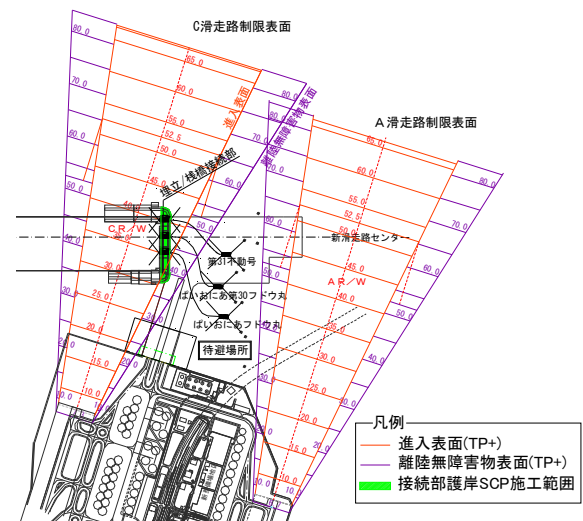


図-5 A滑走路及びC滑走路の制限表面



工事事務所における監視状況

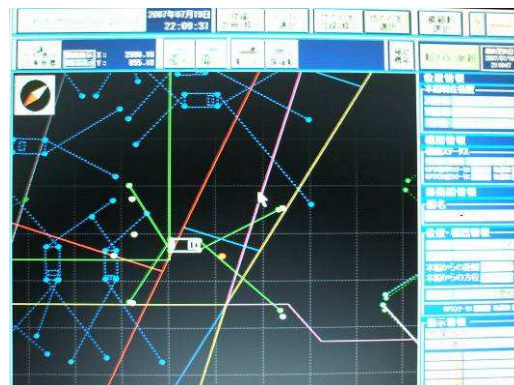


写真-2 投錨管理システムのモニター



作業船上のモニター表示

写真-1 位置管理システムによる高さ監視状況

(2) 制限表面(高さ制限)への対応

厳しい制限表面(高さ制限)に対して、D滑走路工事では、GPS と無線 LAN あるいは既存の packets 通信インフラを利用して、船舶の位置・最高点高さ及び制限表面高さ等の情報を、工事事務所及び船舶上のモニターでリアルタイムに監視することができる情報施工管理システムを使用している⁵⁾。

このシステムは、主に工事用船舶側の GPS と PC ならびに無線 LAN などの通信端末と、陸上側の無線 LAN サーバー設備及びサーバーPC、監視モニターで構成される。GPS を使用した場合の精度は 2～3cm 程度であり、工事事務所へのデータ転送頻度は 1 分程度、船側では 1 秒間隔で位置及び制限表面高を把握することが可能である。工事事務所及び作業船上での監視状況を写真-1 に示す。

(3) 作業船の輻輳への対応

D滑走路工事では SCP 船を同時に 13 隻使用したため、各船のアンカー位置、他船のアンカーとの上下関係を正確に把握できる投錨管理システムを導入した。これより合理的な移動・転船が可能となった。作業船上でのモニター表示状況を写真-2 に示す。

(4) 施工実績

接続部護岸で使用した SCP 船はリーダー部の最大高さが 70m 以上もあり C 滑走路の制限表面に抵触することから、SCP 工事は C 滑走路の運用制限が行われる夜間(20:45～7:45)に行った。標準施工サイクルを表-3 に、SCP 打設状況を写真-3 に示す。

SCP 船は C 滑走路の運用制限が開始される 20:45 に待機場所から施工場所に移動を開始し、係留完了後 SCP の打設を行う。また C 滑走路の運用制限が解除される 7:45 までに確実に離脱するため、トラブル発生も想定した移動時間を考慮して SCP の打設時間は 6:00 までとした。また、運用制限が行われない昼間は、A 滑走路と C 滑走路の間の離陸無障害物表面が設定されていないエリアで待機した(図-5 参照)。

表-3 標準施工サイクル

19:30 ～ 19:40	夕礼
19:40 ～ 20:30	SCP船移動準備
20:45	C滑走路運用制限開始
20:45 ～ 23:30	SCP船移動・係留
23:30 ～ 6:00	SCP打設
6:00 7:15	SCP船移動・係留
7:45 ～	C滑走路運用制限解除



写真-3 SCP 打設状況

4. SCPの品質管理

(1) 材料の品質管理

SCP には千葉県産の山砂を使用し、現場海域までガット船にて運搬した。積み込み土量の検収作業を省力化するためにポータブルの検収装置により積み込み形状を3次元的に捉え、事前に登録したガット船の船倉の形状データと合わせて土量を算出する土量検収システムを導入した(図-6, 写真-4)。

SCP に用いる砂は、圧密沈下促進のための砂杭の透水性を考慮して、シルト分以下の細粒分含有率の許容値を $F_c \leq 10\%$ とし、現場に搬入されるガット船ごとにパンフロック試験（簡易メスシリンダー法）を行った。 F_c 値は質量百分率の値であるのに

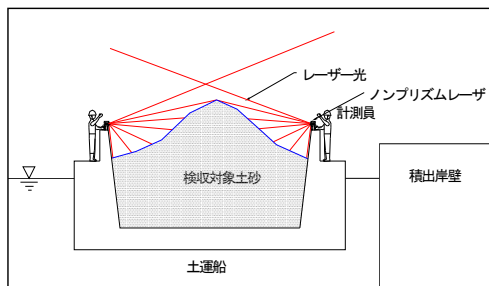


図-6 土量検収要領図

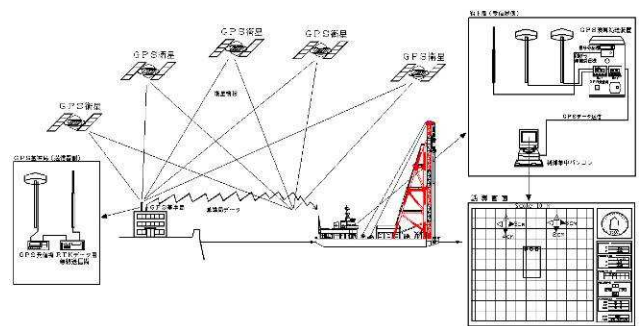


図-8 船位管理システム図

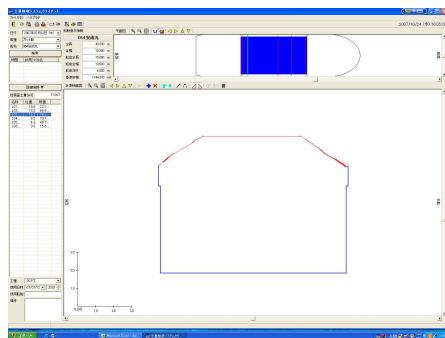


写真-4 土量検収システムの画面



写真-5 砂杭の位置管理システムのモニター

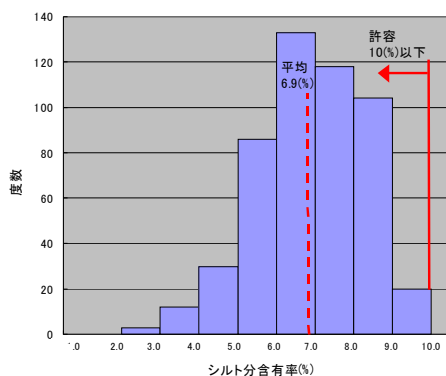


図-7 パンフロック試験結果ヒストグラム

対し、パンフロック値は体積百分率の値であるため、事前にこの2つの値の相関係数を求めておき、 $F_c \leq 10\%$ あることをパンフロック値で確認した。SCP に使用した砂の F_c 値のヒストグラムを図-7 に示す。

(2) SCP の位置管理

SCP船の位置決めは、RTK-GPS測位システムを用いた船位管理システムにより行った。SCP船のブリッジ上のモニターに表示されるSCP船の計画位置とのずれ量によりオペレーターが操船ウインチを遠隔操作し計画位置にSCP船を誘導して砂杭位置の許容値 $\pm 20\text{cm}$ に収まるよう管理した。船位管理システムを図-8に、ブリッジ上でのモニター表示状況を写真-5に示す。

(3) 砂杭の出来形管理

a) 砂杭の深度及び砂の締固めの管理

砂杭の天端・先端深度は、工事区域内に設置された潮位計のデータとケーシングパイプ先端の深度を検知する GL 計により確認した。また、ケーシングパイプ内の砂面高さを検知する SL 計により確認した排出砂量(締固めた砂量)が、砂杭体積に体積変化率(=1.35)を乗じた値以上であることを確認した。作業船上での砂杭深度の管理状況を写真-6 に示す。

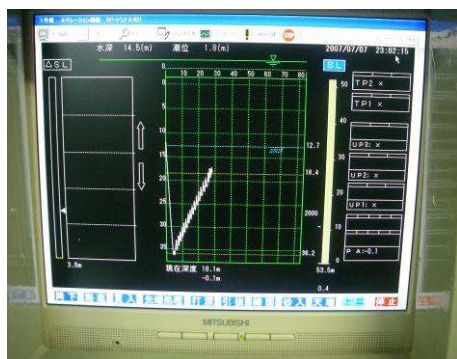


写真-6 砂杭の天端・先端深度の確認用モニター

b) 砂杭のN値

砂杭造成後、杭芯においてチェックボーリングを行った。N値の深さ方向の分布を図-9に示す。N値は深度方向に増大し、平均N値の管理値（高置換改良部 $N \geq 15$ ，低置換改良部 $N \geq 10$ 以上）を満足するものであった。

c) 砂杭の変形係数

接続部護岸の高置換 SCP 改良は、鋼管矢板井筒の側方変位を抑える横抵抗を目的としているため、チェックボーリング時に孔内水平載荷試験を実施し、砂杭の変形係数を直接確認した。一般に、人工的に造成した砂杭のように緩い砂地盤における孔内水平載荷試験では、ゾンデを孔内に挿入する際に孔壁を緩めてしまい、変形係数が小さく評価されることが考えられる。そこで、通常の孔内水平載荷試験（LLT）に加えて、孔壁の乱れを極力抑え砂杭の変形係数を精度よく測定することを目的として自己掘削式のセルフボーリングタイプ孔内水平載荷試験（SBLLT）も実施した。

孔内水平載荷試験による砂杭の変形係数の計測結果を表-4に示す。LLT ではやや小さい変形係数が測定されたが、これは試験時の孔壁の緩みの影響と思われる。SBLLT では $E=1475N$ であり、設計値 $E=700N$ 以上の値が得られた。人工的に造成した砂杭の変形係数を測定する場合には、孔壁の緩みが少ないSBLLT が有効である。

5. おわりに

D滑走路の埋立部と栈橋部を接続する接続部護岸工事では、運用中の既存滑走路の制限表面下で海上SCP施工を行った。多数の船舶が輻輳し、かつ作業時間が夜間のみに制約される中で、D滑走路工事において採用された船舶の位置・高さ管理システムなどの技術を用いて、海上SCPの急速・大量施工を実現した。また、砂杭の品質管理においても、設計上要求される性能を満足することができた。

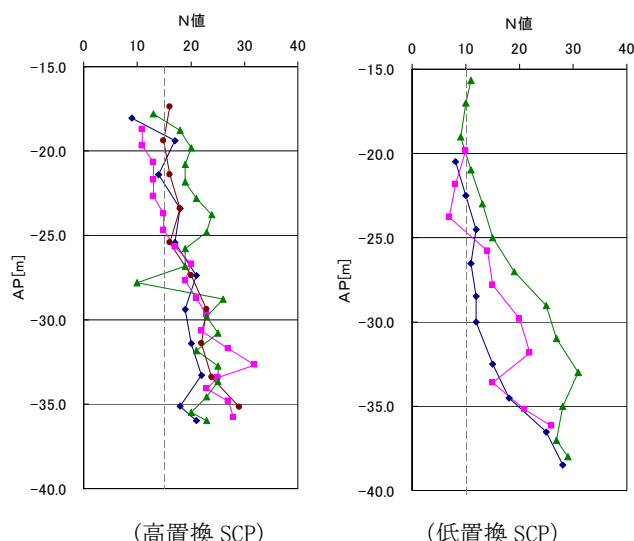


図-9 チェックボーリングによる砂杭の杭芯のN値

表-4 砂杭の孔内水平載荷試験結果

Br. No	試験種類	試験深度	変形係数E (kN/m ²)	N値	EとNの関係
No. 3	LLT	AP-26.4m	5,203	19	E=274N
No. 4	LLT	AP-26.4m	9,563	17	E=568N
No. 6	SBLLT	AP-26.4m	26,541	18	E=1475N

参考文献

- 宮田正史，野口孝俊，福本裕哉，相河清実：羽田空港D滑走路の事業概要について－栈橋・埋立組合せ工法による海上空港－，基礎工，Vol.35，No.1，2007。
- 青柳孝義，秋山義信，永嶋聡志，山下久男，西海健二，石濱吉郎：鋼管矢板基礎に用いる高耐力継手の開発，第32回海洋開発シンポジウム論文集，2007年7月。
- 坂梨利男，加藤浩司，新原雄二，宮田正史，野口孝俊：地盤変形の影響を考慮した鋼管矢板井筒護岸の設計（その1），（その2），（その3），第42回地盤工学会発表論文，2007。
- 砂坂善雄，新原雄二，田代聡一，浅沼丈夫，宮田正史，野口孝俊：羽田空港D滑走路の埋立／栈橋接続部護岸の耐震性能設計について，第11回地震時保有耐力法に基づく橋梁等基礎の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，2008年1月。
- 加藤一志，鹿毛 量：D滑走路建設工事における航空安全対策について－空港運用下における高さ制限と24時間海上空港建設工事－，東京国際空港（羽田空港）再拡張事業技術報告会（第3回）技術報告集，2007年7月。