

東京国際空港 D 滑走路の施工について

The Construction of Tokyo International Airport D-Runway

木村 秀爾*

Shuji Kimura

石原 和征*

Kazuyuki Ishihara

森 仁司*

Hitoshi Mori

花房 秀敏*

Hidetoshi Hanafusa

要 約

本報告は、東京国際空港 D 滑走路建設工事のうち、連絡誘導路建設のためのジャケット工事と埋立部に採用した軽量混合処理土による埋立工事について述べたものである。

ジャケット工事では、1,600 t 吊級全旋回式起重機船を用いて長尺 1 本化杭の打設及びジャケット据付けを行い、杭打設の平面許容誤差 100 mm に対して平均誤差 23 mm、ジャケット据付けの平面許容誤差 125 mm に対して平均誤差 31 mm と良好な施工精度を確保することができた。

また埋立部護岸のうち、栈橋部との接合部護岸（鋼管矢板井筒）への土圧低減を図るために用いた軽量混合処理土工法（SGM：Super Geo Material）では、原材料の浚渫粘性土毎に配合設計を行うと共にポンプ圧送後の諸数値データを検証することで配合設計へフィードバックし、長距離圧送に見合った流動性を確保した上で、軽量で高強度の埋立造成を施工することができた。

目 次

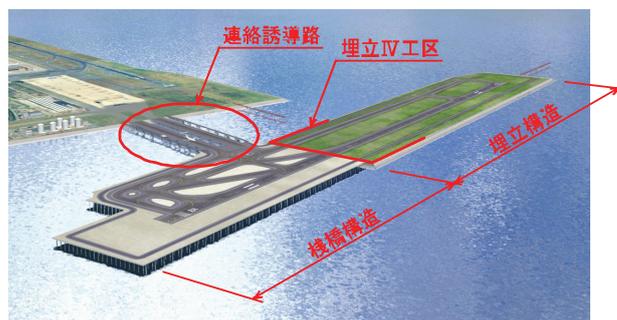
- § 1. はじめに
- § 2. 工事概要
- § 3. ジャケット工事について
- § 4. 軽量混合処理土工法について
- § 5. まとめ

§ 1. はじめに

本工事は、航空輸送ネットワークの要である東京国際空港の年間発着能力を現在の約 29.6 万回から 40.7 万回に増強するため、新たに 4 本目の滑走路となる D 滑走路を建設するものである。D 滑走路は、建設位置が多摩川の河口部に位置するため、河川の流況を阻害しないように栈橋と埋立てのハイブリッド構造である（図一1）。また、契約形態は、ゼネコン、マリコン及び鉄鋼の 15 社異工種建設共同企業体による設計・施工一括方式である。

工期は、平成 19 年 3 月 30 日から平成 22 年 8 月 30 日までの 41 ヶ月で、施工は埋立部 4 工区、栈橋部 4 工区、ジャケット製作 1 工区の 9 工区分割による分担施工である。当社は、護岸埋立部、現空港と D 滑走路を結ぶ連絡誘導路、ジャケット製作の 3 工区の構成員である。

本報告では、連絡誘導路部のジャケット工事及び護岸埋立部の軽量混合処理土による埋立工事に着目し、施工方法及び施工上の留意点について述べるとともに、施工



図一1 D 滑走路完成予想

上の課題を明らかにし、これを解決するための工夫についても述べるものである。

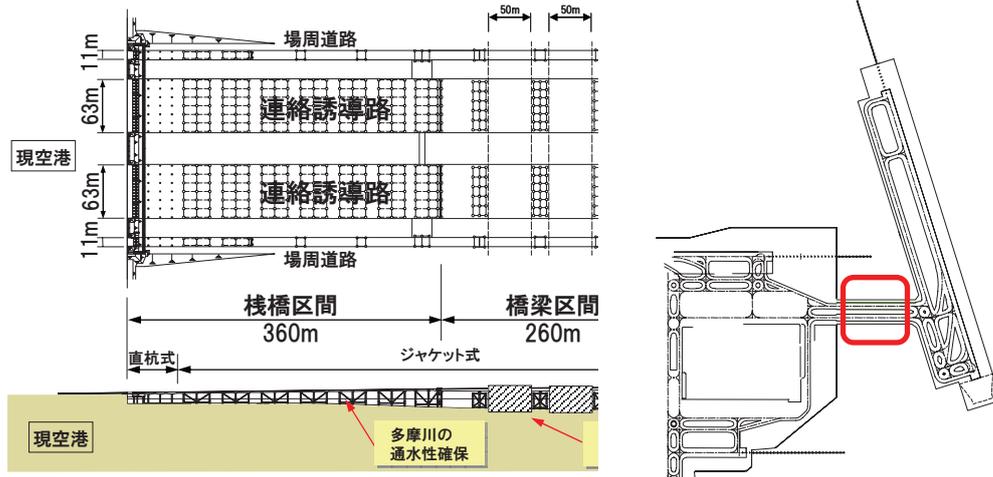
§ 2. 工事概要

2-1 連絡誘導路工事の概要

連絡誘導路は、図一2 に示す現空港と新滑走路島を結ぶ南北の 2 ルートの航空機の連絡通路である。また、連絡誘導路の両側には管理用車両が通行する場周道路が設置される。総延長は 620 m で、連絡誘導路及び場周道路ともに、栈橋部と小型船舶用航路を確保するための橋梁部で構成されている。

栈橋部では、鋼管杭を打設後にジャケットを据付けて下部工とし、PC 梁の架設後に PC 床版を設置して上部工を建設した。橋梁部の下部工構造は、鋼管杭及びジャケット式であり、上部工構造は、鋼桁と PC 床版（連絡誘

*関東土木（支）羽田 D 滑走路（出）



図一 連絡誘導路概要

導路), 及び鋼床版板桁 (場周道路) である。

2-2 埋立工事の概要

滑走路埋立部は、4つの工区に分けられており、埋立延長 2,007 m のうち多摩川寄り端部工区の 559.4 m を当社が構成員である護岸・埋立Ⅳ工区が施工した。

埋立部護岸の構造は、一般的な傾斜堤護岸の形式 (築堤・捨石・被覆石・上部工より構成) である。護岸基礎の地盤改良は、沈下を許容した経済設計を目指し、低置換 (30%) のサンドコンパクションパイルで締固めを行った。最大で 4 m 程度と予測される圧密沈下のうち舗装完成後の残留沈下量 (約 1.0 m) には、オーバーレイにより対応する計画である。

埋立部の基礎は、サンドマットおよびサンドドレーンにより地盤改良し、埋立材料に岩ズリ (代替材として人工石材、水和固化体も使用)、山砂、幹旋土を使用して埋立を行った。また、第一航路浚渫や床掘置換工で浚渫した土砂を有効利用するため、埋立内部に中仕切り堤を築造して埋立材に使用した。

埋立Ⅳ工区は栈橋部と隣接した工区であり、埋立部の沈下および側圧により栈橋部との接合部に変状が生じると予想された。接続部付近の圧密沈下を抑制し、接続部鋼管矢板井筒への土圧を低減する目的で、気泡材を混入した軽量混合処理土 (以下 SGM) を接続隣接部に打設した。SGM は比重 1.0~1.15 で埋立材より軽く、高強度 ($qu \geq 440 \text{ kN/m}^2$) であるため、圧密沈下抑制および側圧軽減が期待できた。軽量混合処理土の詳細は § 4 に述べる。

2-3 運用中の滑走路に係る制約条件

D 滑走路は、運用中の A 滑走路及び C 滑走路の直角方向に建設するため、航空法に規定される制限表面により工事を実施する上で高さ制限を受ける。進入表面、転移表面及び離陸無障害物表面に抵触する工種の工事は、滑走路の運用を停止している時間帯 (C 滑走路では 20:45 から翌朝 7:45 まで 11 時間、A 滑走路では 0:40 から 3:40

までの 3 時間) に限り作業を実施することができる。

連絡誘導路工区の北側連絡誘導路部及び埋立Ⅳ工区全域は、C 滑走路の転移表面、離陸無障害物表面及び進入表面下となるため、大型起重機船を使用する鋼管杭打設、ジャケット据付作業及びサンドコンパクションは、上記滑走路の運用停止時の夜間作業となった。

§ 3. ジャケット工事について

3-1 ジャケット工事の概要

東京国際空港 D 滑走路建設外工事の栈橋部及び連絡誘導路部にはジャケット構造 (工場製作された鋼管トラスを鋼管杭で海底に固定する構造) が採用された。

この工法のメリットは主要な鋼構造部分を工場製作し、大型ブロックの一括据付けにより、品質の確保と現地工期の短縮が図れるところである。

ジャケットの施工は「本杭先行方式」で行った。これは仮受け杭として兼用する先行杭を打設し、ジャケットを据付け、この後に残りの杭 (後行杭) を打設するものである。仮受け杭として本杭を使用するため、先行杭の精度確保がジャケット据付け精度に繋がる重要なポイントであった。

3-2 鋼管杭打設の施工手順と課題及び対策

(1) 施工手順

全長約 65 m の鋼管杭の打設に 1 本化杭打設方式を採用し、1,600 t 吊級全旋回式起重機船により打設した。1 本杭打設時の杭天端レベルは、隣接滑走路の制限表面に抵触するため、前述の夜間時間帯で完了させる必要があった。

このため、制限表面に抵触しない高さの導材台船 (先行杭 2 本打設可能 写真一参照) を機装して準備作業である導材打設時間を省略し、夜間には杭打ち作業のみを行うことにより、時間内の確実な杭打設が可能であった。先行杭の本数 ($n=4$ 本) は、ジャケット重量 (約 750 t) と杭 1 本当りの設計支持力 (200 t) から決定した。

鋼管杭打設の手順は以下のとおりである。

- ① 導材台船を事前に RTK-GPS 測量により打設位置に配置し、その後、1,600 t 吊起重機船を打設場所に移動させ、鋼管杭を建て込んだ。
- ② 鋼管杭を海底に自沈させていき、自沈が終了した時点でパイプロハンマにより鋼管杭の一次打設をパイプロハンマと導材台船が干渉しない高さまで行った。
- ③ 油圧ハンマにより鋼管杭の二次打設を行い、鋼管杭を支持層へ打ち止めた。

(2) 打設精度確保の課題

先行杭の打設精度は、海上工事での鋼管杭の打設実績から平面精度は 100 mm 以内とし、ジャケットの先行杭部分のレグ内径の設定もこの値より算定した。打設精度に影響を与える課題として、以下の点が挙げられる。

① 長尺 1 本化杭の工場製作精度

鋼管杭の管理基準は、鋼管杭の形状及び寸法の許容差 (JIS A 5525 鋼管くい) により、横曲がり許容値は長さの 0.1% 以下となっている。本工事で使用する長さ約 65 m の杭では、工場製作時の元曲がりりが 65 mm 以内まで合格となり、平面精度に対する許容値の割合が高い。

② 日照の温度差による曲がり

鋼管杭表面に直射日光があたる部分とあたらない部分で温度差が生じることにより杭に曲がりが生じる。この日照曲がりの大きさを 2 ケースに分けて検討した。

CASE1: 鋼管の 1/4 断面が材軸方向へ熱膨張⇒47 mm

CASE2: 鋼管の 1/3 断面が材軸方向へ熱膨張⇒75 mm

この曲がり量は、許容平面誤差 100 mm に対する割合が高く、打設精度に影響を与える恐れがある。さらに、長尺 1 本化杭の横曲がりと日照曲がりは、施工時には、複合した曲がりとして生じる可能性があった。

(3) 打設精度確保の課題に対する対策

今回の施工では、鋼管杭の長尺 1 本化杭の曲がりによる影響を解消するために、以下の対策を行った。

- ① 鋼管杭製作上の横曲がりに対しては、測量を慎重に行い、導材台船のパイルキーパーにより曲がりの影響を段階的に補正しながら打設を行った。さらに、1 次打設中、位置のずれが大きい場合には杭を引抜き、再建て込みを行った。
- ② 先行杭は、原則的に、日照曲がりが発生しない夜間に行うことにした。制限表面に抵触しないエリアにおいて、工程上、昼間に打設する必要がある場合は、鋼管杭表面の温度差を抑制するため、打設直前まで台船上で放水し冷却した。

(4) 先行杭の打設精度結果

図-3 は、栈橋部先行杭全 102 本の平面変位の分布を示したものである。先行杭は、平面誤差 ≤ 65 mm の精度で打設を行うことができた。平面変位の平均値も 23.5 mm であり、平面変位の規格値 100 mm に対して良好な打設精度が得られた。



写真-1 導材台船

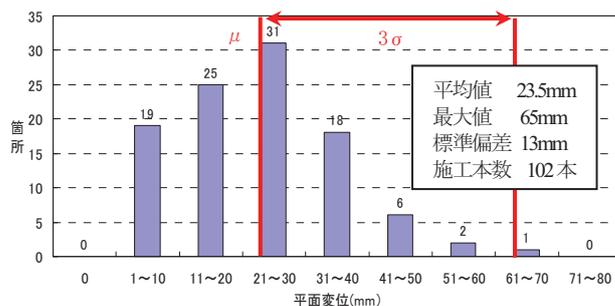


図-3 先行杭の平面誤差分布



写真-2 ジャケット据付

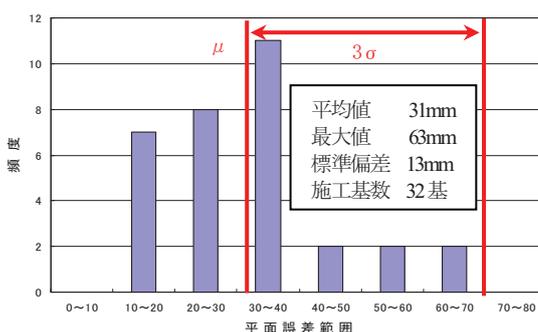


図-4 ジャケット据付の平面誤差分布

3-3 ジャケット精度と据付手順

(1) ジャケット精度

図-4 は、ジャケットレグ芯ずれのうち最大値をジャケット据付け誤差としてまとめたものである。これによると 125 mm の許容値に対して平均値 μ が 31 mm、標準偏差 σ 13 mm であり $\mu + 3\sigma$ は 70 mm となった。

ジャケット据付けには、主に 1,600 t 吊級全旋回式起重機船を使用した (写真-2 参照)。

(2) ジャケット据付手順

ジャケット据付けは、起重機船のウインチ調整、ブーム旋回及び吊フック巻き下げ動作でジャケットレグを先行杭に挿入し、その後、自動追尾データにて平面誤差を確認しながら同様の動作を繰り返して行った。

ジャケットレグ内には仮受け部材を工場にて予め設置しており、杭天端に仮受け部材を載せることにより、ジャケットを杭天端上に据付ける構造とした(図-5 参照)。このため、先行杭の打ち止め高さを計測し、製作工場にて仮受け部材取付け高さでジャケット天端高さを計測結果に合わせて製作することにより、ジャケット据付高さの精度を確保した。

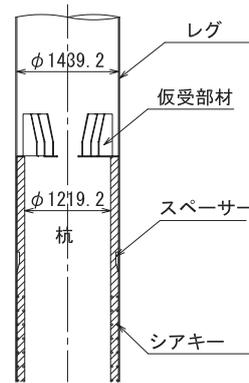


図-5 杭～ジャケット結合

3-4 杭～ジャケット間のグラウト工の課題と工夫

(1) グラウトの強度の検討

鋼管杭とジャケットは、杭とレグの空隙にグラウトを注入することにより結合され、上部工反力は、レグ内面と杭頭部に設置されたシアキーとグラウトの支圧力を介して鋼管杭に伝達される構造である(図-6 参照)。

グラウト強度は、設計強度 26 N/mm^2 より、ばらつきによる係数 (1.2) と水中施工に対する強度低下 (1/0.7) を考慮してグラウトの配合強度 = 45 N/mm^2 とした。

(2) グラウト配合の課題と工夫

グラウト配合は、プラントから海上の注入場所までの運搬時間及び台船での注入時間を考慮して決定した。

表-1 に示すグラウト必要性状を定め、配合強度 45 N/mm^2 の配合試験を繰り返し実施した。その結果、表-2 に示すグラウト配合が得られた。

(3) グラウト注入方法

グラウトは市中プラントにて調達し、所定位置に海上運搬して潜水作業にて注入する方法を採用した。

グラウトの海上運搬及び注入のため、運搬台船と注入台船を艀装し、特に注入台船にはグラウトの分離を抑えるためアジテータを設置することにした。

グラウトに先立ち、グラウト型枠をレグ下端に設置した。先行杭打設箇所は鋼製型枠を用いて海中にて取り付け、後行杭打設箇所はグラウトシール材を予めジャケット製作工場にて取り付けた。グラウトは、充填を確実にを行うため、1次と2次に分けて行った。

1次グラウトでは、ジャケットレグ下端 70 cm から 110 cm の範囲をグラウト注入して基礎杭とレグを仮固定し、2次注入の底型枠とした。1次グラウト注入量は流量計を用いて管理するとともに、充填状況を1次グラウト確認用バルブより確認した。

2次グラウトは、1次グラウトが硬化した後、2次注入用バルブから打ち上げた。グラウト注入量は1次注入と同様に管理するとともに、基礎杭天端におけるオーバーフローにより2次グラウトの充填が完了したことを確認した。また、基礎杭天端部分のグラウト材を採取してマッドバランスで単位体積重量を測定することで海水から

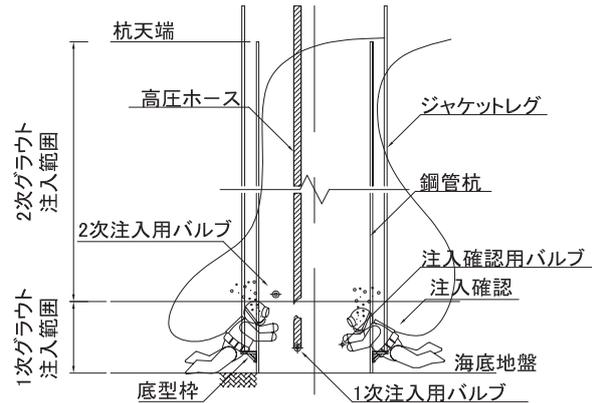


図-6 グラウト注入 (1次)

表-1 グラウト目標性状

	目標性状	備考
流動性測定 (Pルート)	20±3秒	練上がり3時間保持
ブリーディング試験	3%以下	20時間経過後

表-2 配合試験結果

水	セメント	細骨材	不分離材	混和剤		経過時間	P=0 流下時間	
(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	高性能AE (%)	遅延剤 (%)		0	180
391	869	869	0.20	0.75	0.20	(秒)	17.1	20.9

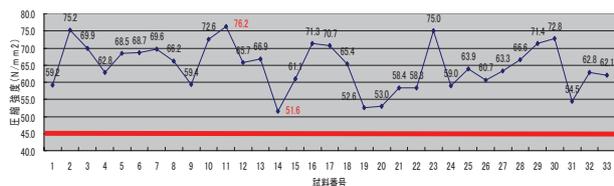


図-7 グラウト圧縮強度

グラウト材に置き換わっていることを確認した。

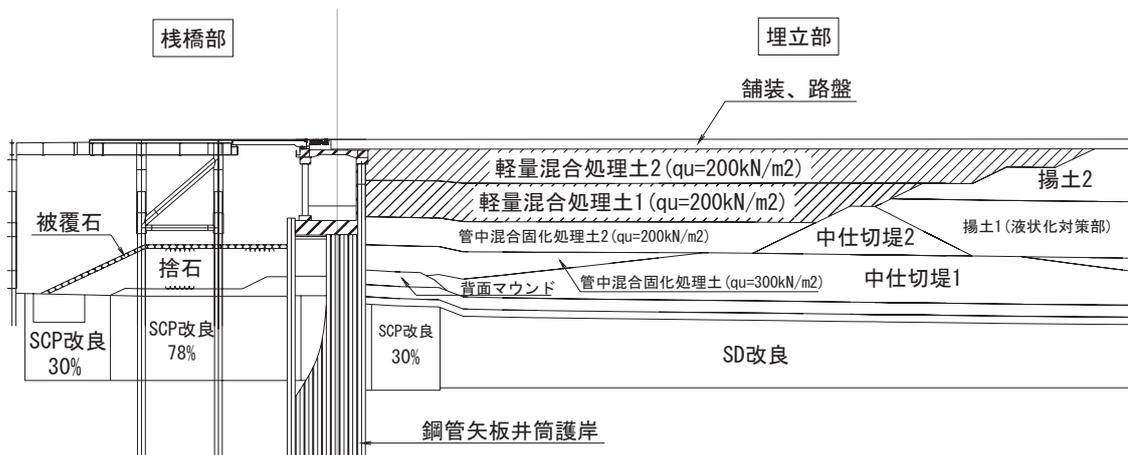
(4) 注入結果

図-7 は連絡誘導路棧橋部における現場搬入時に採取したグラウトの圧縮強度試験結果を示したものである。図に示すとおり、配合強度の 1.1~1.7 倍の強度を確保できた。またグラウト流下時間は 20 ± 3 秒を満足し、配管内の分離及び閉塞を起こすことなく打設することができた。

§ 4. 軽量混合処理土工法について

4-1 軽量混合処理土工法の概要

東京国際空港 D 滑走路建設外工事においては棧橋部



図一8 埋立工事（接続護岸部）概要

と埋立部を連結する鋼管矢板井筒への埋立部からの土圧低減を図るため、栈橋部との境界に位置する護岸・埋立Ⅳ工区において軽量混合処理土工法（以下SGM）が施工された（図一8参照）。SGMは、軟弱な浚渫粘性土を材料として用い、水・固化材・発泡性の軽量化材を混練して打設することで軽量かつ高強度の埋立材として利用するものである。

本工事でのSGMの総施工数量は約80万 m^3 で、これまでの国内総施工実績数量52万 m^3 を超える過去最大規模の工事である。護岸・埋立Ⅳ工区では2009年5月～11月までの7ヶ月の工程でSGMプラント船2船団を用い約5,000 m^3 /日の急速施工を行った（写真一3参照）。

4-2 施工手順

SGM材料には、D滑走路建設外工事で行われた第一航路移設及び東京港湾内の他工事で発生する浚渫土を用いた。浚渫土は土運船により浚渫箇所から海上輸送され、護岸外に錨泊したSGMプラント船まで運搬し、浚渫土を加水・調泥した後に固化材と軽量化材を混練してSGM軽量土を製造した。固化材として高炉B種セメント、軽量化材としてタンパク系の起泡剤（モノクリートFM-H）を用いた。また、SGMプラント船では随時、浚渫土を採取し、密度やフロー値、土源情報、セメント添加によるフロー値低減率を確認して土質の判定を行い、使用する浚渫土の土質の変化に応じて、適切な量の固化材・軽量化材を添加することでSGMの品質を確保した。

プラント船で製造されたSGM軽量土は打設箇所まで圧送され、陸上に設置した100t吊のクローラークレーンにより圧送管の筒先を移動しながら打設を行った。打設箇所が広範囲にわたるため、打設位置及び高さに応じて打設用クローラークレーンの重機足場を適時造成・撤去しながら施工を行った。打設後のSGM軽量土は散水車により散水養生を行った。

4-3 品質管理手法

土圧低減のために、SGM軽量土は軽量かつ高強度である必要があった。また、SGMプラント船で製造された



写真一3 SGMプラント船 龍神Ⅱ

SGM軽量土は配管により打設箇所まで長距離圧送（550～700m）するため適切な流動性を持つ必要があった。このためSGM軽量土の単位体積重量、強度、フロー値の3項目を品質管理項目に定めた。

以下、この3項目について述べる。

(1) 単位体積重量

SGMの設計単位体積重量 γ_t kN/m^3 は、圧密沈下完了後に水中となる部分では平均11.7 kN/m^3 以下、気中部分では平均10.2 kN/m^3 以下と規定されている。これは一般的な土砂の単位体積重量（約18 kN/m^3 ）と比較して57～65%の重量である。沈下後水中部に位置する部分では、長期養生中の気泡への水の浸入による単位体積重量の増加を考慮して、単位体積重量で0.5 kN/m^3 の余裕を持たせ11.2 kN/m^3 を現場配合目標値とした。

(2) 強度

軽量混合処理土の設計基準強度 q_{uck} は有効上載荷重に対する安全性から決定され、 $q_{uck} = 200$ kN/m^2 と規定されている。しかし、現場で施工されるSGM軽量土は原泥の物性や、施工条件によりばらつきを有する。そこで、軽量混合処理土技術マニュアル¹⁾に従い、現場強度の分布は正規分布となると仮定して、ばらつき（変動係数）や不良率を設定し、設計基準強度から室内目標平均強度を設定した。この結果、室内目標平均強度 q_{ui} （材齢91日強度）は440 kN/m^2 以上となった。

(3) フロー値

本工事では既往の実績値をもとにSGM軽量土のフロ

一値を 18 cm として規定した。フロー値が小さい（流動性が小さい）場合、圧送管内での摩擦の影響で消泡率が大きくなり SGM 軽量土の密度が増加する傾向がある。

ここで、室内配合試験を行い、原料土ごと（第一航路浚渫土で 2 種類、他事業土で 1 種）に上記の室内目標平均強度と単位体積重量、フロー値を満足する固化材と起泡材の添加量、調整土フロー値を決定し、SGM 配合とした。つまり種々の要因に起因する強度のばらつきや強度不足を考慮した上で室内目標平均強度を設定し、それに見合う配合設定を原料土ごとに定めた。その上で、筒先で採取した試料の密度、フロー値や一軸圧縮試験の結果を検証し、配合設計にフィードバックさせた。

4-4 結果

設定した配合で SGM 軽量土を製造・圧送したところ長距離の配管圧送による大幅な消泡が確認された。

既往の施工においては圧送による消泡については起泡剤の割増しで対応するのが一般的であったが、本工事では従来の施工と比較して圧送距離が 550 m～700 m と長く、打設量も多いことから、消泡率を極力小さくし単位体積重量のばらつきを抑制するため、流動性を高めることにした。具体的には、筒先での SGM 軽量土のフロー値を 22 cm を目標に管理し、消泡率を 40～60% の範囲で抑制することとした。

この結果、水量が増えるがセメント添加量を増やすことで強度については要求品質を確保した。当初、SGM 軽量土の室内平均目標強度を $q_{u91} = 440 \text{ kN/m}^2$ となる配合設計で管理していたが、上記の消泡率の問題、打設時の材料分離や海水の巻き込みを考慮してセメント添加量を高めに設定し、 $q_{u91} = 600 \sim 700 \text{ kN/m}^2$ となる配合設計を用いて施工を行った（表-3 参照）。また打設箇所において逐次強度の確認を行い、配合を調整した。

図-9、10 に水中部配合の SGM 軽量土における筒先で採取したモールド試料の単位体積重量と一軸圧縮強度の結果を示す。材齢 91 日での単位体積重量は平均値で 1.09 g/cm^3 、一軸圧縮強度が 812 kN/m^2 であった。

単位体積重については配合設計の 1.12 g/cm^3 と比較して若干小さめとなっているが、ほぼ目標通りの結果が得られた。一軸圧縮強度が配合目標強度 $q_{u91} = 600 \sim 700 \text{ kN/m}^2$ よりも大きく出ているのは、原料土の判定の段階で安全側に判定されていることが要因であると推定する。打設箇所で採取したボーリング試料についても、材齢 91 日で単位体積重量が平均 1.10 g/cm^3 、一軸圧縮強度が平均 431 kN/m^2 、不良率も 7.6% と所定の品質を満足できる結果が得られており²⁾、今回行った品質管理手法は有効に機能したと言える。

§5. まとめ

ジャケット工法は、気象や海象現象の影響を受け易い

表-3 SGM 配合（水中部）

	乾燥土	水	セメント	気泡	合計	フロー値
当初	260.2	775.6	78.0	6.2	1,120	18cm
検証後	189.7	845.3	81.0	4.0	1,120	22cm
増減量	-70.5	69.7	3.0	-2.2	—	—

単位：kg

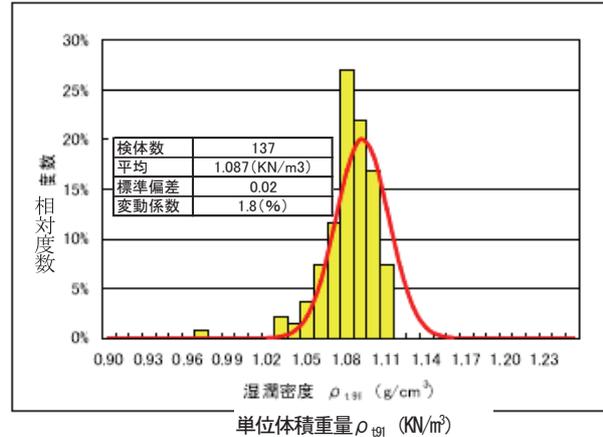


図-9 単位体積重量分布

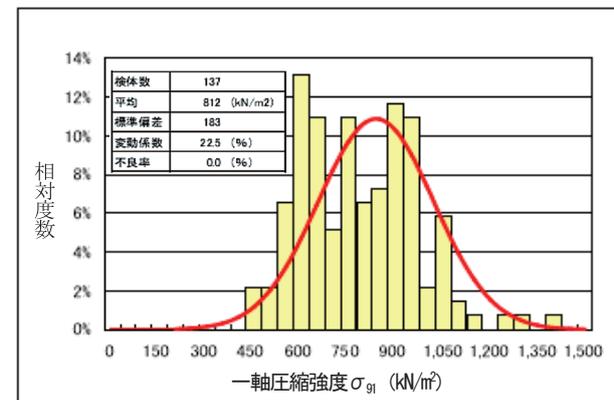


図-10 一軸圧縮強度分布

海上工事の作業量を極力減らしながら、強固な海洋構造物の下部構造を構築するのに優れた工法であり、東京湾のような内湾での大型起重機船による施工においては、高精度で施工可能なことが分かった。

また、SGM は材料として種々の工事により発生した浚渫土を再利用可能にした環境に優しい工法であり、今回、長距離圧送可能な流動性を持ちながら、単位体積重量、一軸圧縮強度とも要求品質を確保することが可能であることが確認できた。

本工事の経験を通して、今後の適用増加が予想される上記工法を始め、様々な知見を得ることができた。

参考文献

- 1) (財)沿岸技術研究センター：軽量混合処理土工法技術マニュアル（改訂版），2008.7
- 2) 永留健ほか：D 滑走路における軽量混合処理土の大量急速施工について，東京国際空港建設技術報告会（第 8 回），2009.12