

関西国際空港護岸工事に採用した 深層混合処理工法の施工

関西国際空港株式会社建設事務所

正会員 福手 勤

関西国際空港株式会社建設事務所

同上 奥村 隆一

東洋・竹中土木・りんかい・寄神・大旺建設共同企業体

河田 庄司

東洋・竹中土木・りんかい・寄神・大旺建設共同企業体

正会員 吉田 貴昭

1. はじめに

建設予定海域の海底地盤層序は、表層の沖積粘土層が沖側護岸部で約20m、陸側護岸部で約16mであり、その下部には薄い砂礫層、さらに洪積粘土層が約140m堆積している。空港島においては護岸ならびに埋立部の全面にわたり、沖積粘土層を改良することとなっている。護岸築造工事は6区に分割発注され、東洋・竹中土木・りんかい・寄神・大旺建設共同企業体は図-1に示す空港島の南西部に位置する6工区である。地盤改良はサンドドレーン工法が主に採用され、その他に深層混合処理工法（以下DM工法という）が採用されている。当工区では沖側と陸側にそれぞれ隅角部があり、この地点は最も波当たりが強く、特に安定性が必要とされる箇所であるため、沖積粘土の強度を高めることを目的として、化学的地盤改良であるDM工法が採用されている。

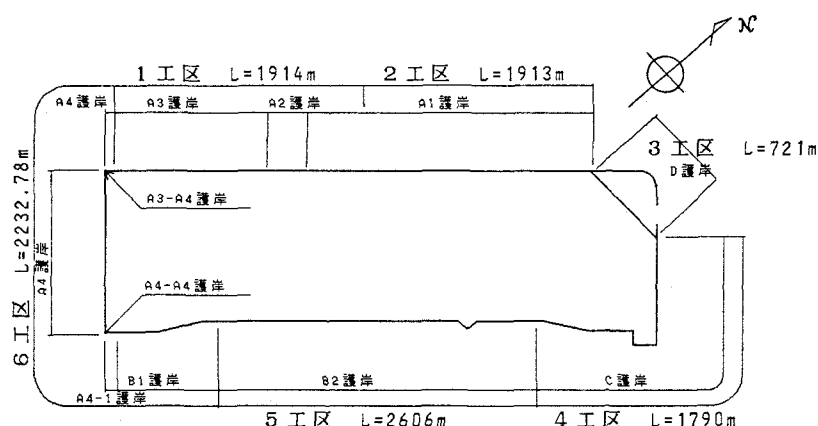


図-1 関西国際空港建設計画平面図と護岸施工区画割

今回、当工区において採用したDM工法による地盤改良構造体を壁式と格子式とし、固化材に新開発の遅硬セメントを採用した。施工するに当たり、施工管理・品質管理上いくつかの技術的知見が得られたので報告を行なう。

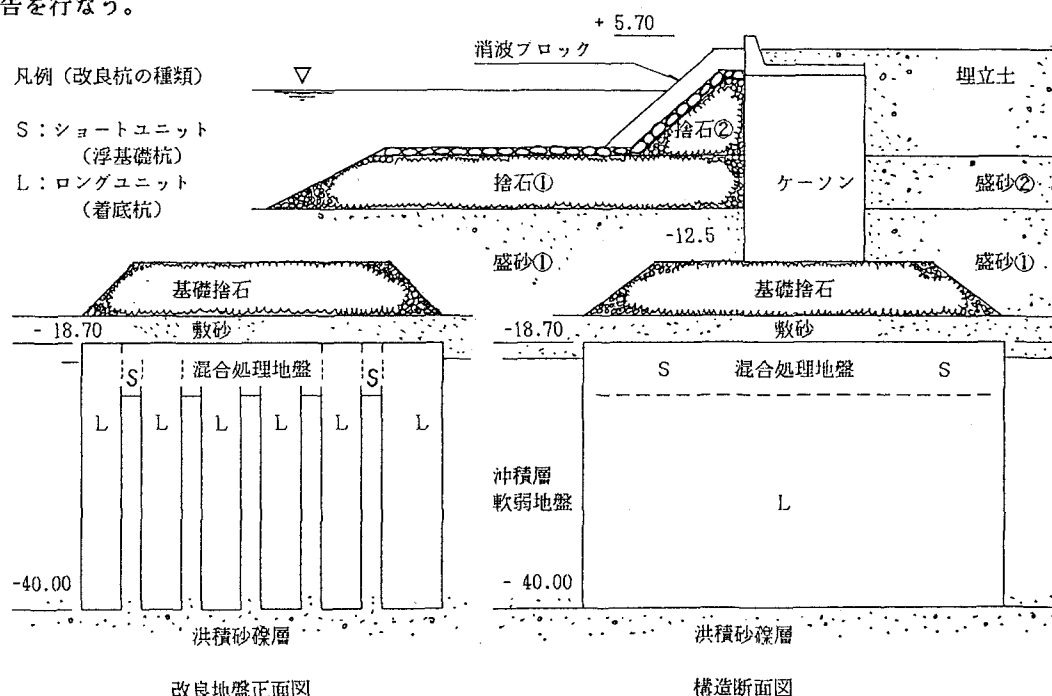


図-2 ケーソン護岸構造概念図

2. DM施工と技術管理

2-1 施工条件と課題

DM改良は図-2に示す様に、水深約20m、軟弱土の改良厚さ約20mしかも外洋に近い海象条件下での施工である。また設計面から確実なオーバーラップ施工（以下ラップ施工という）による一体性のある地中改良体の形成と所要強度の確保及び、海洋環境保全からセメント混合による盛上り土の活用と濁り防止等が要求されている。

2-2 確実なラップ施工

1) DM施工方式の選定

固化材の吐出方式には施工機械によって、引抜時吐出方式と貫入時吐出方式に大別され、図-3に改良作業要領図を示し対比する。

①引抜時吐出方式：

所定改良速度や固化材の所定量吐出が可能で安定した強度が得られ、施工途中のトラブルにも対処できるので大型処理機に多いが、貫入時と引抜時の処理機先端軌跡のズレから、接合面の信頼性が貫入時吐出に比べて劣る。

②貫入時吐出方式：

接合部の信頼度は高いが地盤強度、含水比等の変化による貫入抵抗の変動や施工中のトラブル等に対処しにくいので、小型処理機に多く採用されている。

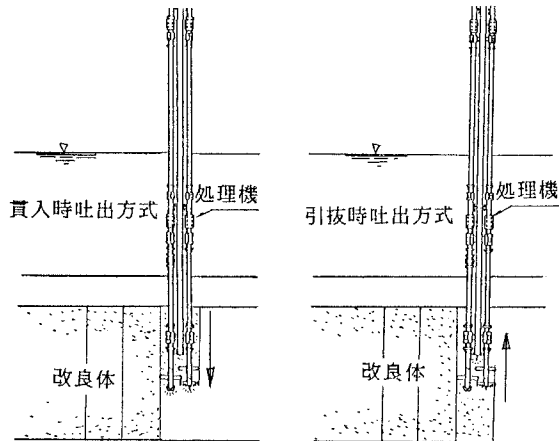


図-3 改良作業要領図

以上の施工性能を比較検討した結果、本工事では接合部の信頼性を高くするため、大型機を貫入時吐出方式に改造し使用することとした。

2) 固化材の選定

固化材は近年開発された遅硬セメントを採用し、初期強度の上昇を抑えることでラップ施工可能時間の延長を図る事とした。DM工法におけるラップ施工限界時間は普通ポルトランドセメントで24Hr、遅硬セメントで72Hrを目途としている。

①固化材の種類

セメント系固化材には成分構成からベリット系、中庸熱系、石灰系の3種類に大別される。

ベリット系セメント： β -C₂Sを70%以上、C₃Sを15%以上含むセメントに、適量の高炉水砕を混入したセメント。

中庸熱系セメント：中庸熱ポルトランドセメントに、これの2倍以上の高炉水砕を混入したセメント。

石灰系セメント：普通ポルトランドセメントと石膏を2:1内外の割合に配合したセメントに、その2倍内外の量の高炉水砕を混入したセメント。

本工事においてはブロック毎に種類の異なるセメントを使用した。施工上の大差はないが、石灰系が他の2種に比べてセメントスラリーの粘性が高く、吐出圧が8kg/cm²～10kg/cm²と2～3割高い結果となった。

②経時的温度変化の室内試験成績と現地実測値比較

温度センサーを取付けた鋼管パイプをロングユニットに1本、ショートユニットに1本、施工直後に処理機を利用し、所定の深度まで押し込む方法で温度計を設置した。温度センサーは合計6個取付け、ショートユニットは改良体に1個、未改良箇所1個とし、ロングユニットに4個取付けた。設置断面を図-4に示し、温度計測結果を図-5に示す。100日まで計測値が得られたのは1箇所だけで、5箇所は17日～27日の間に観測不能となった。室内試験の養生パターンは、遅硬セメント（中庸熱系）の室内断熱養生試験方法を採用したので図中へ挿入した。

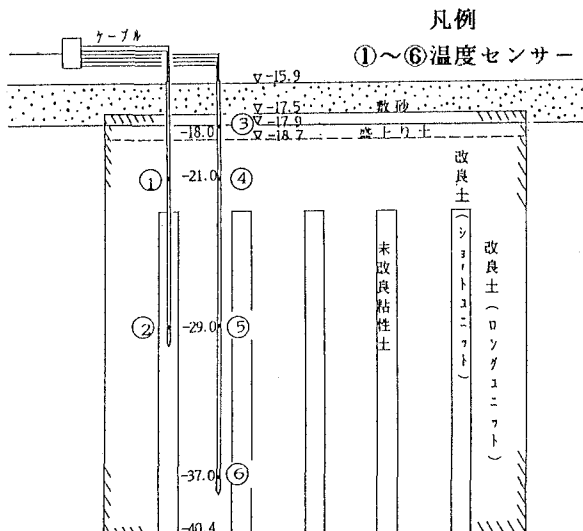


図-4 温度計測位置断面図

計測結果を見ると打設時温度（基礎温度）は22度で室内実験（18度）より現地改良体の方が高く、改良温度上昇が早く開始している。温度上昇パターンは類似しているが、室内断熱養生試験方法では材令10日で36度の定温養生としたが、現地材令は20日～40日で温度上昇のピークに達し、最高温度も47度に達した。大きな温度差が発生した要因の一つとして、現地改良地盤の初期発熱温度差と隣接杭との発熱相剩効果を推察することができる。

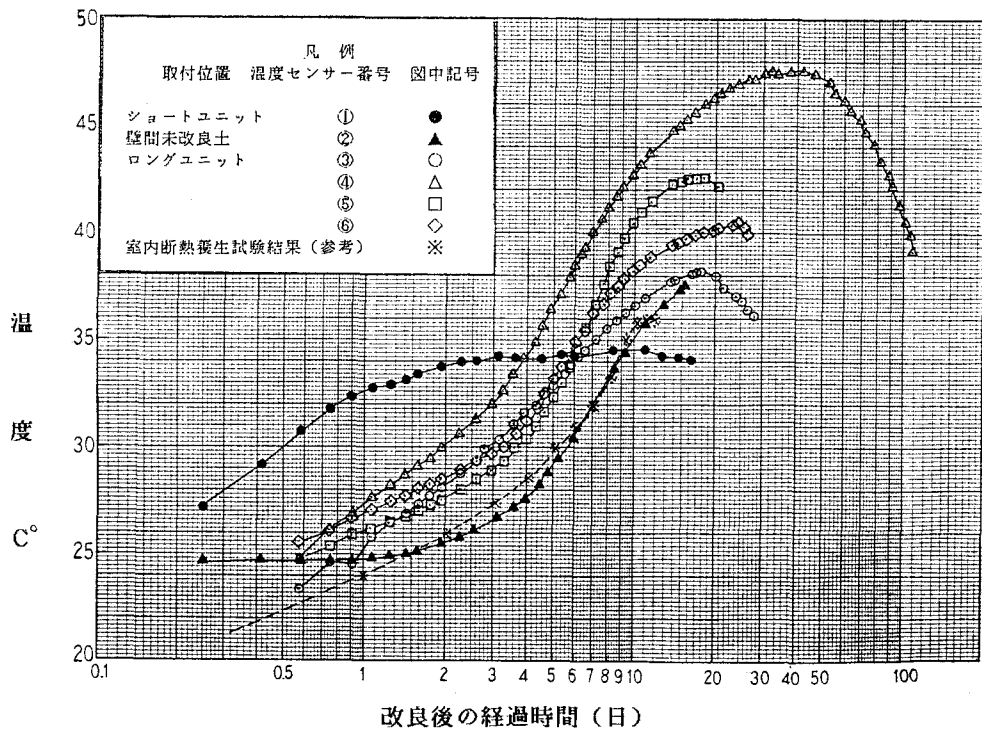


図-5 DM改良後の経時的温度変化

③経時的強度変化の室内試験成績と現地強度比較

室内強度試験結果と現地チェックボーリングのコア強度試験結果とを比較をする。現地強度試験は採取位置の違いや改良作業に支障の無い範囲での採取等の条件によって、同一条件下で種類別にサンプリングできなかったが、図-6に示す様に相対的な強度の経時変化を見ることができる。室内強度試験結果は室内断熱養生（図-5の参考曲線※を参照）にて得られた3種類の遅硬セメント（6品種）を、加重平均して一軸圧縮強度を求めたものである。強度発現は3日強度において室内試験結果の2～3倍を示した。又7日強度も3～4倍を示し、初期強度は現地発現が高くなる事を示した。28日以降はほぼ室内試験結果と同様の強度を示し、長期強度は設計強度 50 kgf/cm^2 以上の発現状況である。

遅硬セメントの開発目標である材令3日で 5 kgf/cm^2 以下に対し、少し課題は残るが、施工面から見れば支障なく、目標を満足する結果が得られた。

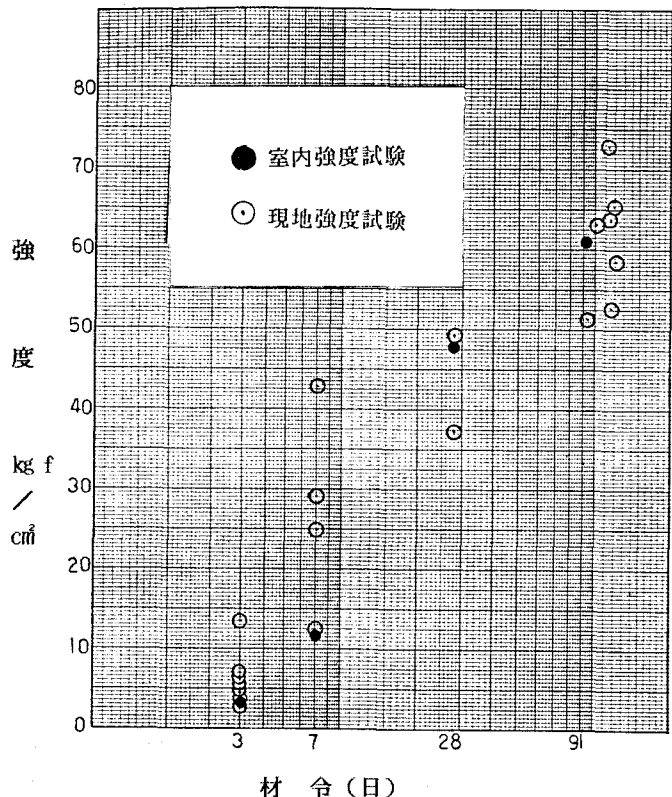


図-6 室内強度試験結果と現地強度試験結果

3) 施工精度とラップ幅

処理機先端部の軌跡を連続して求めるには、平面座標と標高の3次元図表により求め、改良杭の出来形、施工精度、ラップ幅を確認する。ラップ幅の設定と施工実績について述べる。

①ラップ施工管理法

処理機先端軌跡を図-7に示す処理船上の計器類と自動位置決めシステムによって改良杭の垂直性と接合部（オーバーラップ）の施工管理（軌跡管理図の作成）を行なう。管理手順を図-8にフローで示す。

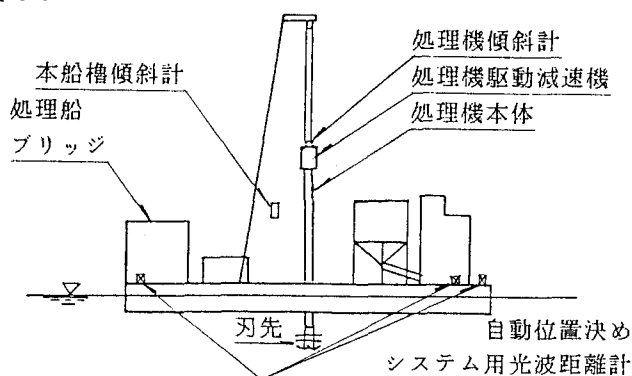


図-7 処理船上の計器類

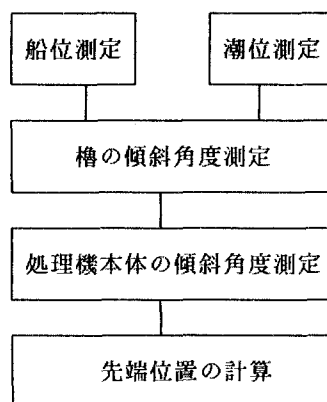


図-8 管理手順フロー図

②ラップ幅の設定

計算式による算出

施工誤差は通常採用する 5.0cmを10.0cmに設定変更し、ラップ幅を次式で計算した。

$$d = R - \sqrt{R^2 - (\alpha \cdot D)^2} + S \quad \text{-----} \quad \textcircled{1} \quad \alpha = \frac{F \cdot \sin \alpha}{\beta \cdot \gamma \cdot \rho_u} \quad \text{-----} \quad \textcircled{2}$$

ここに使用予定処理機の施工方式・形状・寸法を対応させると

d = 所要ラップ幅 (cm)

 σ_0 = 改良ブロックの許容圧縮応力度 (5 kgf/cm²)

R = 処理機掘削翼の直径 (90.4cm)

 $\beta =$ 信頼度係数（買入時吐出方式は 0.8 とする）

D = 処理機軸間距離 (70.0cm)

 γ = 現場強度係数 (室内試験結果との比は1.0)

$S =$ 施工誤差 (10.0cm)

処理土の一軸圧縮強度の平均値 (50.0 kgf/cm^2)

 α = 断面有効係数 (単位接合面積)

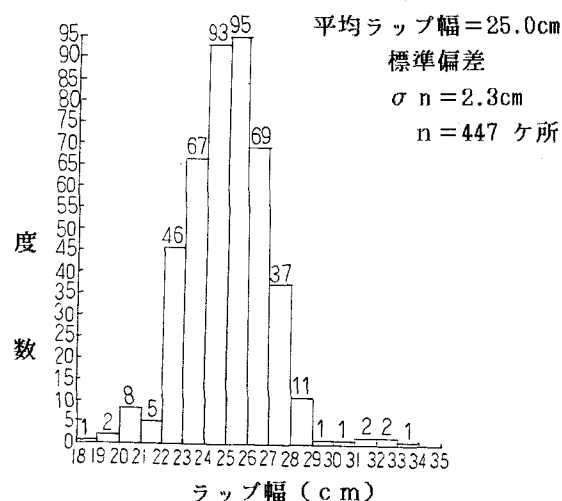
有効接合面積) F = 材料としての安全率 (通常 3 とする)

従って $d = 25\text{cm}$ と決定した。しかし、冬期に施工した 1 ブロックは、配杭を変更したためラップ幅を 3

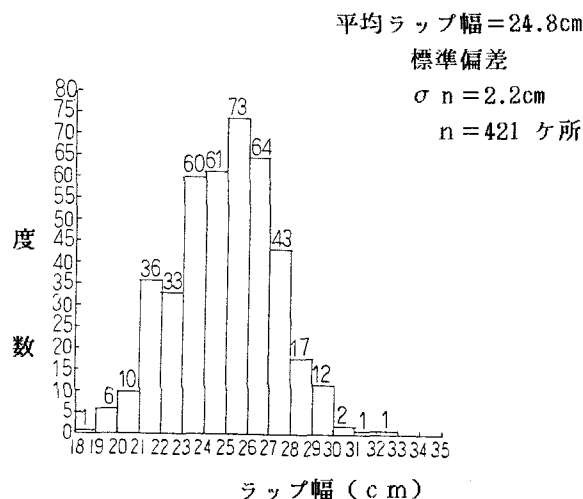
cmに変更した。

③ラップ幅測定結果

i. 平均ラップ幅：ロングユニットでは改良延長4 m毎に測定した6測点の平均、ショートユニットは3測点の平均を改良杭1本当たりの平均ラップ幅とした。



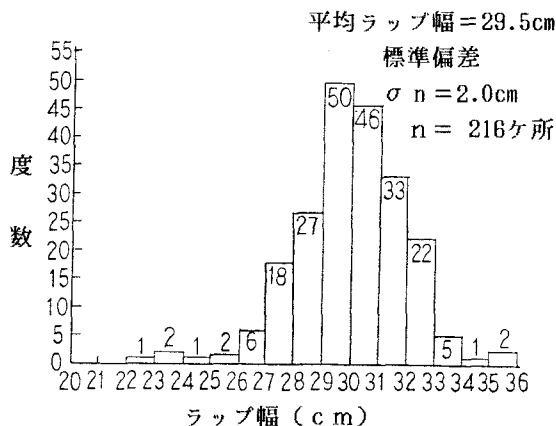
壁に隣接する杭の平均ラップ幅頻度分布図



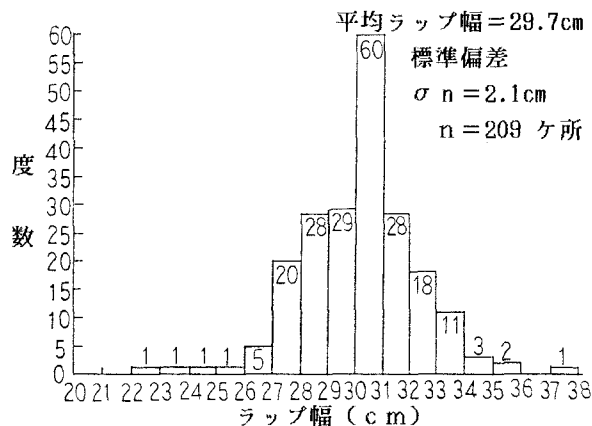
壁方向に打設する杭の平均ラップ幅頻度分布図

図-9 平均ラップ幅測定結果

ii. 冬期に施工したブロックの実績



壁に隣接する杭の最少ラップ幅頻度分布図



壁方向に打設する杭の最少ラップ幅頻度分布図

図-10 冬期に施工したブロックのラップ幅測定結果

4) オーバーラップ時間

①混合処理手順とサイクルタイム

図-11に示す処理サイクルa~jに従い作業を進める。

- 処理機（処理船）を所定の位置にシフトする。刃先点検・修理を行なう。
- 処理機を海底地盤近くまで引下げる。
速度 $v=2.0\text{m/分}$
- 改良上部への貫入・攪拌を行なう。
速度 $v=0.7\text{m/分}$
- 標準改良部への貫入・攪拌を行なう。
速度 $v=1.0\text{m/分}$
- 支持地盤層への貫入・攪拌を行なう。
速度 $v=0.5\text{m/分}$
- 処理機の着底後先端処理を行なう。
(スラリー吐出後規定時分攪拌する)
- 攪拌を行ないながら引抜きを行なう。
速度 $v=1.0\text{m/分}$
- 次の位置にシフトする。
(刃先点検・修理を行なわない時)
- 処理機点検時に海面上に引上げる。

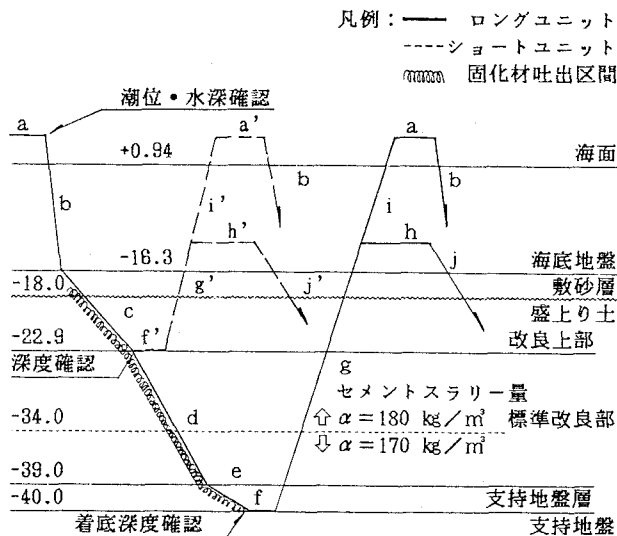


図-11の混合処理サイクルから沖側ブロックの標準サイクルタイムを求めると

$$\text{ロングユニット} = 71.09 \div E \cdot \eta = 87.7 \text{分/本}$$

$$\text{ショートユニット} = 28.87 \div E \cdot \eta = 35.4 \text{分/本}$$

図-11 混合処理サイクル図

②オーバーラップ時間による配杭と施工順序の決定

昭和61年11月に沖側工区の1ブロック（壁式構造）を実施する計画となり、冬期施工の問題点特に長期ラップ時間発生への技術的課題検討を行なった。施工海域の海象データが整備されており、過去5年間の11月及び12月の波高データを基に、ロングユニット1本の標準サイクルタイムとショートユニット1本の標準サイクルタイムを経過時間でプロットし、配杭計画や改良杭打設順序による改良杭と改良杭の接合（オーバーラップ）時間を計算し、与えられた条件の中で最適な配杭計画と改良杭打設順序を立てた。実行可能な処理作業の範囲に基づいてシミュレーションを行っており、海上処理作業に適用した海象判断条件の主要な項目を記述する。

- 施工限界波高（有義波高）は50cmとする。
- 3時間前の気象情報をもって施工中止判定は出来るものとし、処理中の杭が2時間以内で完了するまで継続運転する。
- 施工開始の決定は6時間以上連続して施工が可能な海象条件であるとした。
- 1日の施工時間は24時間連続運転が可能な気象条件であっても20時間で施工中断し、点検、洗浄、機器整備を4時間行なうものとした。

③冬期に施工した改良杭のラップ時間実績

オーバーラップ時間による配杭と杭打設順序に従い決定し施工した結果、壁を形成する方向の最長ラップ時間は43.⁸Hrですべての杭が72.⁰Hr以内であった。壁と隣接する杭の最長ラップ時間は84.⁶Hrが発生したが、目地発生等構造上の問題は発生しなかった。

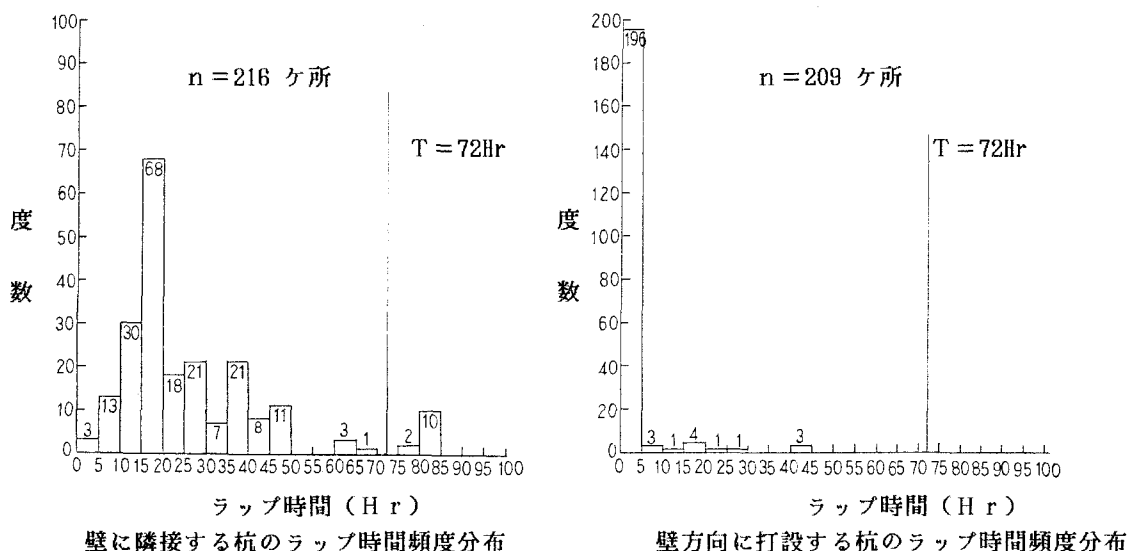


図-12 ラップ時間実績

3. 海洋汚染防止と盛上り土の活用

DM工法の処理作業は攪拌方式であるため、処理機を貫入するために掘削翼と攪拌翼の回転を海底地盤到達前に開始する。そのため海底表土が海水と攪拌され海水の汚濁が考えられるので、汚濁の低減効果を期待して濁り出ない海砂で海底を覆う敷砂を検討した。一方盛上り土にたいする資料は少ない(壁式や格子式の実績が少ない)が、改良層厚の5~10%の盛上り量を予測した。従来この盛上り土は掘削撤去してきたが、本工事においてはこの盛上り土を撤去せず、前もって海底地盤表層に敷砂を散布し、敷砂の一部と盛上り土とともに改良して利用した。

1) 敷砂層厚の検討

改良天端は過去の施工実績から1.0m以上の土覆りがないと、改良天端の強度発現は低下する。敷砂層厚の考えは、処理機先端の攪拌上部翼からセメントスラリー吐出位置までの寸法(機種により0.9m~1.40m)及び敷砂の施工精度(±30cm)から、敷砂層厚は1.7mとし、軟弱な海底地盤を海砂で覆った。

2) 確認調査結果

海底地盤の掘削攪拌による汚濁発生は、定期的に濁度計で調査を行なって監視したが、観測されなかった。盛上り土の改良状況は処理作業完了後チェックボーリングのコアを観察したところ、敷砂層の1.0m付近に改良体があり、改良天端以深の敷砂もセメントスラリーの練混ぜによって改良されており、盛上り土は敷砂と連続して改良体が形成されていることが確認された。

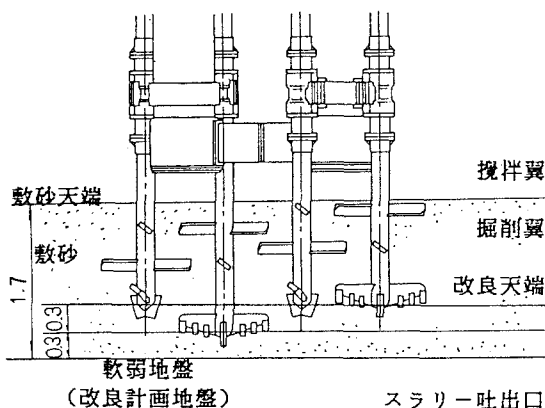


図-13 処理機刃先形状と敷砂

4. おわりに

昭和62年4月16日に施工開始し、昭和62年6月28日に完了した1,056本の改良杭打設は、海象条件も良く計画工程を短縮する事ができた。これに先立って昭和61年11月20日~12月11日に実施した228本は、本文で述べた様に冬期風浪が影響したが、遅延セメントの使用によって施工を完了することができた。改良体の一体性は貫入時吐出方式や遅延セメントの採用、海象記録に基づいたシミュレーションによる配杭や改良杭打設順序の検討等によって、ブロック内には施工目地発生もなく、地中に改良構造体を構築することができた。DM工終了後、DM工区周辺のサンドドレーン工事を完工してからDM工区に基礎捨石を投入、マウンドを整形して昭和62年8月4日ケーソンを据え付け、空港島埋立て護岸の一部として最初に水面から堤体が現れたのである。