

石狩湾新港-10m耐震強化岸壁改良工事 における地盤改良工事の概要 —SDM-Dy工法による施工—

小樽開発建設部 小樽港湾事務所 第2工務課

○河合 淳
長谷 一矢
渥美 洋一

石狩湾新港では、耐震機能の確保と物流効率化を目的として、花畔ふ頭の既設-7.5m岸壁を-10m耐震強化岸壁に改良する工事が実施されている。耐震化に必要な液状化対策のための地盤改良にあたっては、大口径の高速低変位型深層混合処理工法であるSDM-Dy工法を北海道で初めて適用して施工した。本報告では、同工法の施工にあたっての配合設計の考え方、寒冷期施工や既設構造物隣接部における地盤改良効果等の検証結果について述べる。

キーワード：耐震強化岸壁、地盤改良、SDM-Dy工法、配合設計、寒冷期施工

1. はじめに

石狩湾新港では、近年頻発している地震に備え、災害時における札幌圏との動脈の確保、都市機能の維持と速やかな復興を支援するため、耐震機能の確保と既存施設の水深不足改善を図ることを目的として、花畔ふ頭の既設-7.5m岸壁を-10m耐震強化岸壁に改良する工事が実施されている（図-1）。本報告では、石狩湾新港の既設岸壁改良時の耐震強化工事において、SDM-Dy工法¹⁾（NETIS-KT-980134-V）を適用した改良事例について、その地盤改良効果の検証について報告する。



図-1 石狩湾新港地盤改良施工位置図

2. 本施設における地盤改良の概要

(1) 耐震強化岸壁の設計要件

花畔ふ頭は、主に定期コンテナ船や大型セメント船などの船舶が出入りする物流拠点岸壁であり、大規模地震発生後の緊急物資輸送拠点等の整備として、花畔ふ頭3号岸壁に液状化防止対策を施し、耐震岸壁-10mに増深改良する工事が実施されている。耐震強化岸壁の標準断面図を図-2に示す。ふ頭の岸壁背面地盤はゆるい砂質土であり、地震時の液状化防止および鋼管矢板（平成21年度施工）の主働域に相当する箇所へのせん断強度増加対策を目的とした地盤改良が必要となる。耐震化の要求性能は大規模(L-2)地震後に、速やかに、船舶の利用、人の

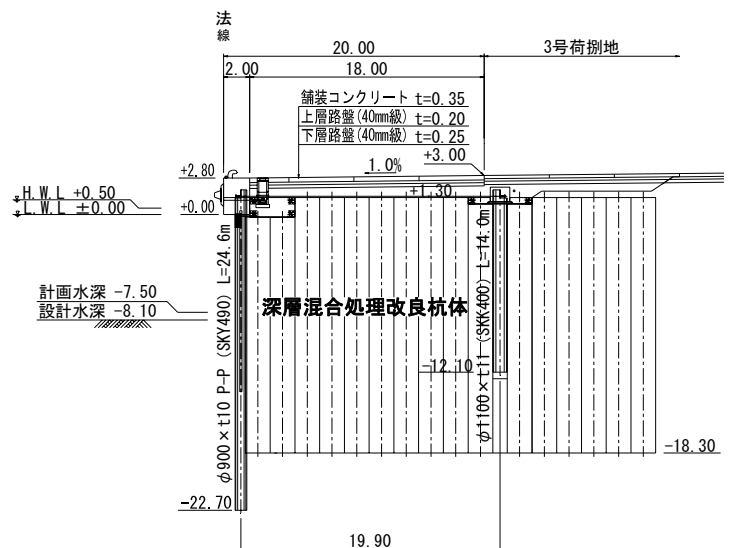


図-2 標準断面図

表－1 工事数量と改良仕様

施工本数	H20:120セット H21:210セット
改良径	φ1.9m×2軸
杭配置	正方形接円配置
削孔長	L=20.6m
改良長	L _c =19.6m
施工機台数	1セット施工
使用材料	高炉セメントB種
混入量	a _w =160kg/m ²
改良目標強度	q _u =400kN/m ²



写真－1 施工状況

乗降及び緊急物資等の荷役を行うことができる耐震強化施設「特定（緊急物資輸送対応）」であり、対象船舶は載貨重量12,000トンの貨物船である。表－1に工事数量と改良仕様、写真－1に施工状況写真を示す。

(2) SDM-Dy工法の概要

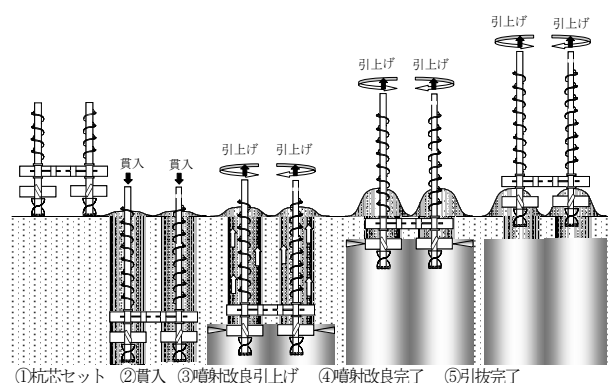
本工法は、従来の深層混合処理工法に比べて、高圧噴射と攪拌翼による混合攪拌のため、大口径の地盤改良が可能であり、改良径D_pは攪拌翼径D_mに対し改良径D_p=2D_m～3D_mとなることこれまでの施工実績より確認されており、攪拌翼と既設構造物との間に適当な距離を置いての施工が可能となる。

本工法の機械設備は、固化材を地盤に攪拌混合するSDM処理機と超高圧大容量ポンプを含むスラリー製造プラントから成る。SDM処理機は、三点支持式杭打機がベースマシンとして使用される。また、攪拌軸は二軸を一对として相反回転させる型式である。噴射圧力、噴射流量、改良時間、及び回転数の指標を常時計測することにより施工管理を行う。図－3には、この工法の施工手順を示した。位置決めを行った後、一对の攪拌軸を相反回転させ、所定深さまで貫入させる。深さを確認し、攪拌軸を逆回転させながら固化材スラリーを40MPaの超高圧で高圧噴射し、設定した改良時間で自動的に引き上げる。この間、噴射供給した固化材量に見合った土をらせん状スクリーで排出させ、地盤変位を抑制しつつ、円柱状の改良体を造成するものである。

(3) 地盤改良効果の検証のポイント

上記に示した耐震強化岸壁に求められる地盤改良条件に基づき、SDM-Dy工法による配合設計の考え方と以下4点の観点から地盤改良効果について検証する。

- ①寒冷期における地盤改良効果の検証
- ②既設構造物周辺部の地盤改良効果
- ③改良体強度確認結果（H21年度施工分）
- ④地盤改良により発生する変位の検証



図－3 施工手順

3. 地盤改良の配合設計

(1) 施工箇所の地盤特性

図－4は、対象地盤の柱状図と細粒分含有量F_c、自然含水比w_nを示したグラフである。土質は、GL-20mまで部分的に有機物が混入しF_c≤20%、w_n=20～40%、N≤20の緩い沖積細砂層である。また、L-2地震動における液状化判定を行った結果、標準貫入試験で得たN値と有効上載圧力から求める等価N値による判定及び繰返し三軸圧縮試験結果を用いて算出したF_L値=0.51～0.61と評価され、完全液状化層であると判定されている。

(2) 現場配合試験

改良材混入量は、室内配合試験の結果をもとに現場試験施工を行い決定した。図－5は3配合による現場試験施工を行い、各改良土コアの一軸圧縮試験の結果である。各配合量の改良強度は、材齢7日で行い、室内配合結果の材齢28日強度から推定した。施工の実施にあたり、適切な改良材配合量は、強度のばらつきを考慮するため、現場試験強度の平均値－標準偏差÷2を代表値として、図－5から必要配合量を算定し、a_w=160kg/m³で計画した。なお、使用改良材の種類は、室内配合試験の強度結果より、高炉セメントB種とした。

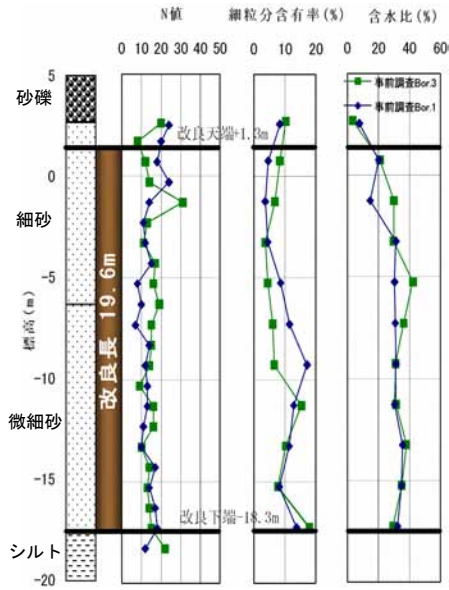


図-4 対象地盤の土性値

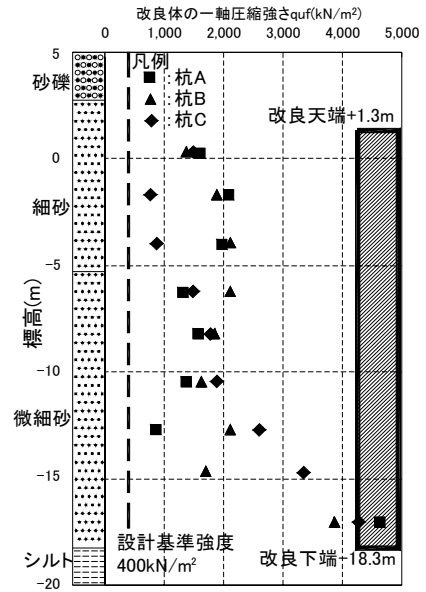


図-6 改良後の強度試験結果

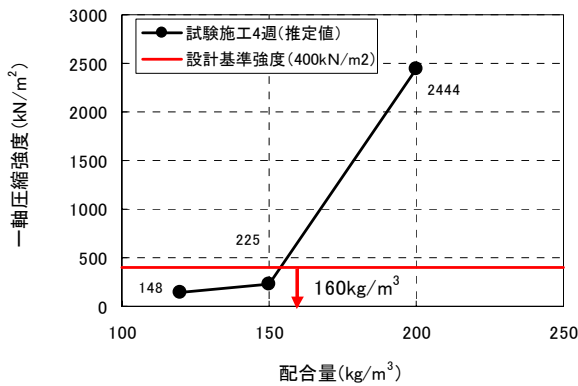


図-5 試験施工杭強度試験結果

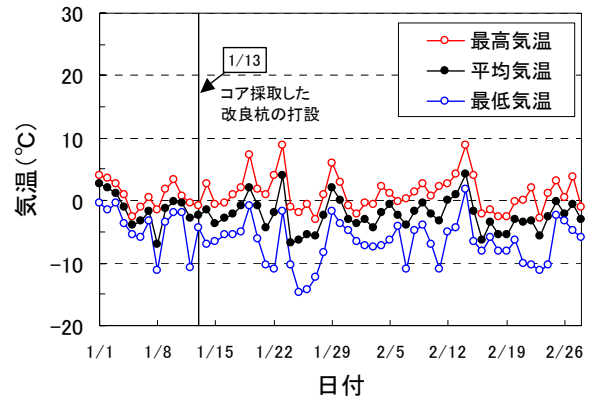


図-7 施工期間の気温

地震応答解析による鋼管矢板天端の残留水平変位量の計算結果から、改良範囲の必要粘着力は $C' = 150 \text{ kN/m}^2$ と評価された。その結果、地盤改良範囲の設計基準強度 q_{ack} は、改良面積率 $a_p = 78.5\%$ とし、 $q_{\text{ack}} = 2 \times C' / a_p = 2 \times 150 / 0.785 = 382.2 \approx 400 \text{ kN/m}^2$ とした。

4. 地盤改良効果の検証

(1) 寒冷期施工における地盤改良効果

北海道のような積雪寒冷地での同工法の施工実績がないことから、ここでは冬期施工した地盤改良体のチェックボーリング結果の分析により、寒冷期における地盤改良効果を検証する。図-6にチェックボーリングによる一軸圧縮試験の結果を、図-7には施工期間中の外気温を示す。改良杭強度については、目標強度 $q_{\text{ack}} =$

400 kN/m^2 に対し、現場強度の最小値は $q_{\text{uf}} = 771 \text{ kN/m}^2$ 、平均 $q_{\text{uf}} = 2,178 \text{ kN/m}^2$ が確認できた。また、改良下端部付近では、 $q_{\text{uf}} = 3,339 \sim 4,605 \text{ kN/m}^2$ の高強度が確認されたが、下層のシルト層に近いので、細粒分の混入により強度が増加したと考えられる。このように、SDM-Dy工法による寒冷期施工においても、十分な地盤改良強度が確認された。

(2) 既設構造物周辺部の地盤改良効果

既設岸壁の耐震補強は、今後の港湾施設整備において喫緊の課題である。しかし、このためには、ある程度老朽化した既存構造物を損傷することなく、既存構造物の際まで確実に地盤改良を行うことが必要であるが、施工機械の設置等の制約や施工による既存構造物への影響を考えると必ずしも容易ではない。SDM-Dy工法による地盤改良体は、地盤改良中心部となる機械攪拌部とその周辺の高圧噴射部から構成され、既設構造物に接するこ



写真-2 杭頭部切断状況

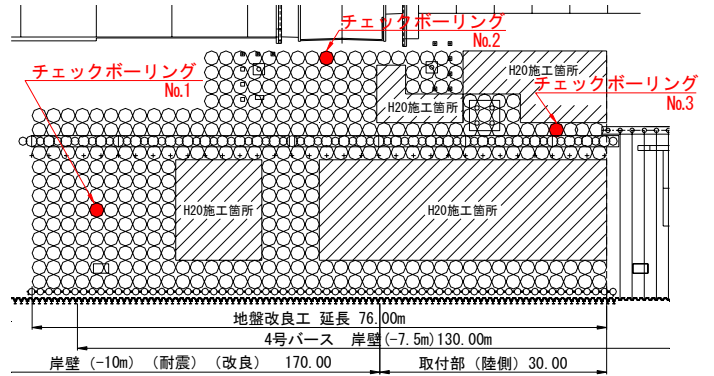


図-10 地盤改良施工平面図 (H21年度施工)

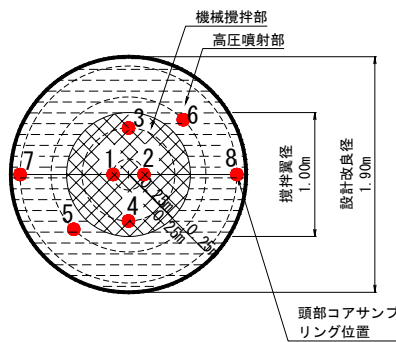


図-8 杭頭部コア採取位置

○ No. 1	△ No. 2	□ No. 3
● 上段平均 (No. 1)	▲ 上段平均 (No. 2)	■ 上段平均 (No. 3)
● 中段平均 (No. 1)	▲ 中段平均 (No. 2)	■ 中段平均 (No. 3)
● 下段平均 (No. 1)	▲ 下段平均 (No. 2)	■ 下段平均 (No. 3)

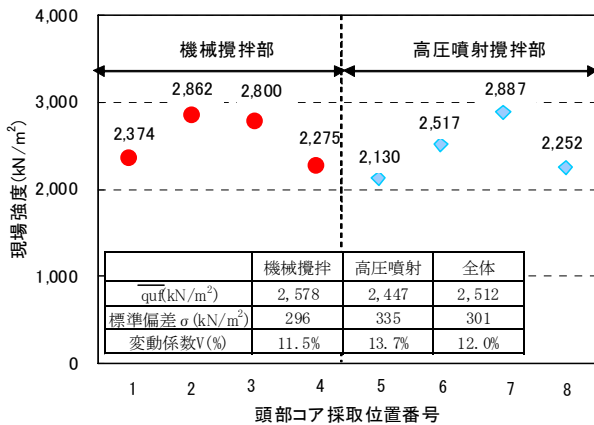


図-9 機械攪拌と高圧噴射攪拌部の強度比較

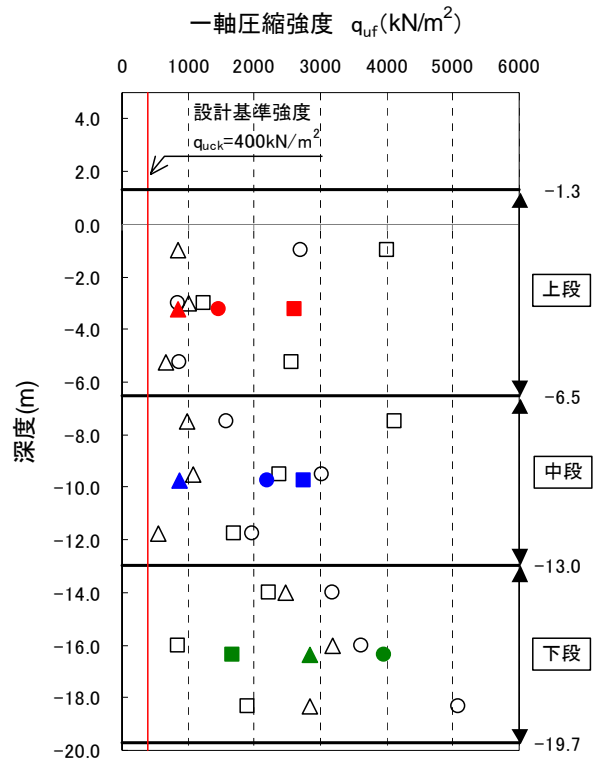


図-11 一軸圧縮強度試験結果 (H21年度施工)

とになる高圧噴射部について中心部と同様に地盤改良効果が得られれば、攪拌翼と既設構造物との間に適当な距離を置いての施工が可能であるSDM-Dy工法は、既設構造物隣接部の地盤改良を高い精度で行うためのひとつの重要なツールと成り得る。そこで、既設構造物に接する高圧噴射部と地盤改良中心部となる機械攪拌部について、(I)と同様のチェックボーリング結果を用いて改良体の強度比較を行った。

チェックボーリングに用いた改良体頭部について、コア採取機を用いて図-8に示す位置(機械攪拌部4箇所

+高圧噴射攪拌部4箇所=8箇所)から1m程度の改良体頭部コアを採取し、現場強度の比較を行った結果を、図-9に示す。機械攪拌部と高圧噴射攪拌部における平均一軸圧縮強さは、それぞれ $q_{uf}=2,578\text{kN/m}^2$ 、 $q_{uf}=2,447\text{kN/m}^2$ であり、両者に有意な強度差は認められない。また、機械攪拌部と高圧噴射攪拌部の全体で $q_{uf}=2,512\text{kN/m}^2$ 、変動係数 $V=12\%$ と改良杭断面の平面的にも、均一な高品質であることが確認できた。

写真-2は、本施工改良体杭頭部をアスファルトカタにて切断し、改良体断面を掘り出した状況である。杭

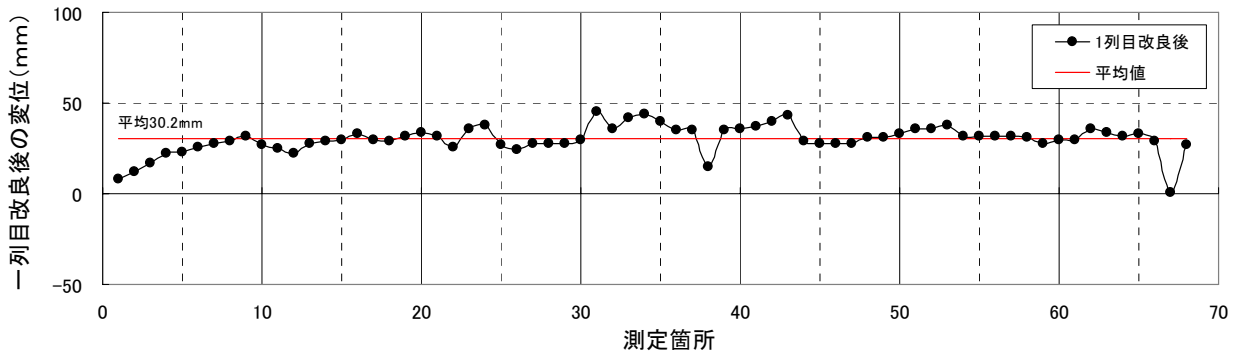


図-1 2 地盤改良後に生じた鋼管矢板の変位 (n=68)

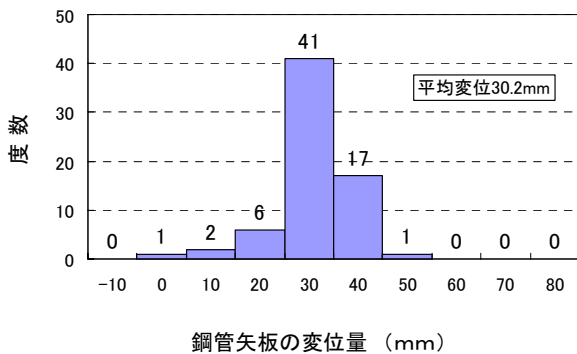


図-1 3 鋼管矢板変位量の分布

頭の掘り出しを行った改良体は、設計天端位置より+50cm分を高く造成したため、地盤の緩み等により、実測改良径は $\phi 2.5\text{m}$ と大きく造成されていた。目視に抛る限り、平面的にも切断面においても機械攪拌部と高圧噴射攪拌部との相違は見られず、強度試験結果と同様に均一な改良断面の平面状況を確認することができた。今回の施工事例では、既設構造体に接する高圧噴射部について、寒冷期の施工においても、中心部と同様、均質で十分な改良強度を達成できていることが確認できる。

(3) 地盤改良強度の検証 (H21年度施工結果)

SDM-Dy工法による地盤改良強度の確認結果として、H21年度の地盤改良施工平面図を図-1 0、一軸圧縮強度試験結果を図-1 1に示す。一軸圧縮強度の結果は、 $550.2\sim 5091.6\text{kN/m}^2$ の範囲に分布し平均値は 2129.56kN/m^2 となり、総じて目標強度 $q_{\text{ck}}=400\text{kN/m}^2$ をかなり上回る改良強度となった一方で、 $q_{\text{ur}}=550.2\text{kN/m}^2$ 、 662.1kN/m^2 といった目標強度をやや上回る程度のデータも存在し、所要の改良強度を確保するためには、今回の配合設計におけるセメント添加量が妥当であることが確認できた。

(4) 地盤改良による変位の検証

地盤改良に伴い発生する地盤変位が少ないことは、地盤改良工法を選定する際のひとつの重要なポイントである。SDM-Dy工法による地盤改良は、固化材量に見合っ

た土をスクリーで排出させることにより地盤変位を抑制する工法であることから、平成21年度施工結果により、実際に生じた地盤変位の発生程度を確認した。対象施設の鋼管矢板直背後の第一列目の地盤改良について、地盤改良後に生じた鋼管矢板の変位を図-1 2に、その変位量の分布をヒストグラム化して図-1 3に示した。これらによると、鋼管矢板第一列目68本について、地盤改良後に生じた地盤変位（鋼管矢板の変位）は平均 3.02cm となり、比較的低変位に抑制されていることが確認できた。

5.結論と課題

石狩湾新港-10m耐震強化岸壁工事におけるSDM-Dy工法による地盤改良施工結果の分析より得られた主要な結論は以下4点である。

- ① 同工法について、寒冷期施工における地盤改良の確実性が初めて実証できた。
- ② 地盤改良体の中心となる機械攪拌部と周辺の高圧噴射部については共に遜色ない十分な改良強度が確認され、既設構造物隣接部における同工法による地盤改良の有効性が確認された。
- ③ 目標強度 $q_{\text{ck}}=400\text{kN/m}^2$ に対し、高炉セメントB種 160kg/m^3 による地盤改良の配合設計の妥当性が現地データより実証された。
- ④ 鋼管矢板直背後の第一列目の地盤改良について地盤改良後に生じた地盤変位は平均 3.02cm となり、地盤改良が比較的低変位であることが確認できた。

今後の課題としては、港湾構造物における同工法を用いた地盤改良の有効性を確認するため、既設構造物隣接部の改良効果、施工による地盤変位とさらに低変位な施工方法等に関するデータを取得し、既設構造物の地盤改良技術として確立していく必要があると考える。

参考文献

- 1) 鈴木孝一・西尾経・田中信哉・松岡大介・齋藤邦夫：SDM工法（高速低変位深層混合処理工法）-機械攪拌併用高圧噴射攪拌による地盤変位の抑制制御型工法の概要と施工事例一、基礎工、Vol.37, No.5, pp88~90, 2009.5