

# 管中混合固化処理工法を用いた超軟弱地盤上への覆土施工

超軟弱地盤、固化版、管中混合固化処理工法

独立行政法人 港湾空港技術研究所 国際会員 北詰 昌樹

○五洋建設株式会社

正会員 大久保 泰宏

五洋建設株式会社

国際会員 新舎 博

## 1. はじめに

著者らは超軟弱地盤上に管中混合固化処理工法による覆土施工の適用性について検討し、施工を行った。施工場所は、石川県七尾市の浚渫土砂処分地であり、空気圧送による浚渫土砂が堆積し、人や重機が載れないような非常に軟弱な地盤（超軟弱地盤）である。土砂処分地では、鉛直ドレンによる地盤改良が予定され、ドレン打設に必要なトラフィカビリティの確保のために改良面積約21,000m<sup>2</sup>（幅70m×延長300m）の覆土の施工が必要であった。覆土の施工は、土砂処分場の容量確保、浚渫土砂の有効利用を図る目的で浚渫土砂を用いた管中混合固化処理工法による固化版施工を採用した。また、本施工に先立ち、設計から施工および施工管理に関するデータを収集するために試験施工を実施した。本報告では、試験施工の概要とその結果について説明する。

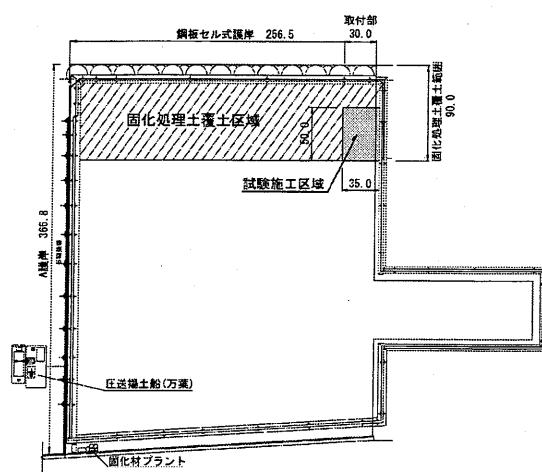


図-1 浚渫土砂処分地平面図

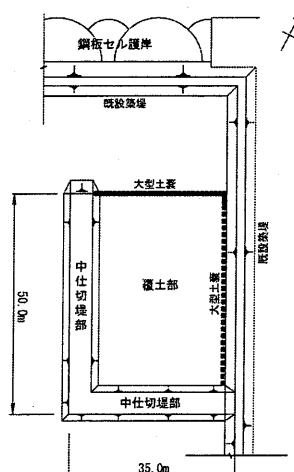


図-2 試験施工位置平面図

## 2. 超軟弱地盤上への固化版施工

土砂処分地内の地盤は、浚渫粘性土をグラブ浚渫し空気圧送で投入した超軟弱地盤であり、事前に行ったコーン試験結果からは、表層から深度1.5mまでは  $qc=30kN/m^2$  程度の非常に軟弱な粘性土が堆積している状態であった。

管中混合固化処理工法は、浚渫土の輸送・埋立方式として一般的である空気圧送方式を利用して、圧送管内に発生するプラグ流の乱流効果により浚渫された粘性土と固化材を混合する工法<sup>1)</sup>である。図-3には空気圧送による混練状況を模式的に示した。図に示すように、圧送管の粘性土は管内に注入した圧縮空気によってプラグ流が形成され、圧送中の粘性土プラグは、管壁との摩擦によってプラグの崩壊や再形成が断続的に生じる。その際、管内に固化材を添加すると、このプラグ流の乱流効果によって圧送中に粘性土と固化材との十分な混練効果を得ることができる特徴である。

同工法は、既存の空気圧送設備に固化材の添加設備を追加することによって対応できるので、比較的容易に設備全体を構築することが可能である。

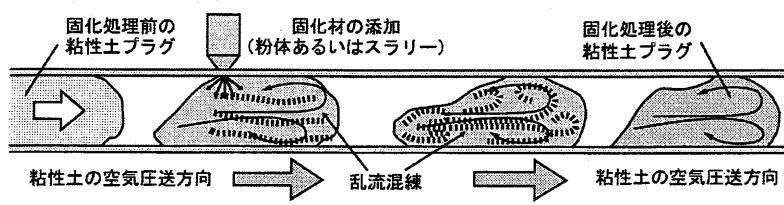


図-3 空気圧送による混練原理概念図

Construction of covering with treated soil on very soft ground by pneumatic flow mixing method

Masahiro Shin-ya, Tomohiro Watanabe (Hokuriku Regional Bureau, Ministry of Land, Infrastructure and Transport)

Masaki Kitazume (Independent Administrative Institution, Port and Airport Research Institute)

Yasuhiro Okubo, Hiroshi Shinsha (Penta-Ocean Construction)

KEY WORDS: Very soft ground, Treated soil, Pneumatic flow mixing method

管中混合固化処理工法を用いて超軟弱地盤上に覆土を行う場合、山土による覆土施工に比べて「浚渫土を固化して覆土に利用するため処分地内により多くの浚渫土を投入することができる。」「処理土は密度（約1.3t/m<sup>3</sup>）が小さく、法勾配（約1:20）が緩いため、山土に比べて覆土施工時の安定性が高い」などのメリットがある。また、原位置固化による表層混合処理工法に比べて「処理地盤の品質のバラツキが少ない」「空気圧送船（施工能力約300m<sup>3</sup>/hr）を利用するため工期短縮が可能」「浚渫土の揚土に用いる空気圧送船をそのまま利用できるため追加の設備投資が少なくてすむ。」などの長所があげられる。以上の点を考慮して、超軟弱地盤上への覆土施工の方法として管中混合固化処理工法による固化版施工を採用し、施工方法の検討を行った。

### 3. 施工方法の検討

#### 3.1 施工方法

管中混合固化処理工法を用いて、直接超軟弱地盤上に処理土を巻き出した場合、超軟弱地盤への処理土のめり込みと地盤の側方流動が懸念された。よって、固化版の施工計画においては、処理土打設による軟弱粘土の側方流動を防止するために中仕切堤の施工を行うこととした。覆土部分については、固化版の品質確保と層厚の均質性を確保するために土木シートを敷設し、処理土の打設を行うこととした。また、本施工に先立ち、設計から施工および施工管理に関するデータを収集するために約35m×約50mの試験施工を実施した。

#### 3.2 配合設計

##### 3.2.1 現場配合強度の決定

試験施工に先立ち、管中混合固化処理土の配合設計を行った。中仕切堤および覆土の設計には、通常の砂を用いた覆土施工方法と同様に、補強材の効果を考慮した支持力理論による方法<sup>2)</sup>を用いた。固化版の層厚、強度の検討については、事前調査より得られたコーン試験の結果をもとに地盤係数法を用いて設計を行い、層厚1.0mおよび設計基準強度 $q_u=115kN/m^2$ を決定した。また、中仕切堤部の施工については、材令3日で重機が作業できるように築堤幅5mで支持力の検討を行った結果、築堤層厚は2.2mとなり、中仕切堤部の設計基準強度は $q_u=95kN/m^2$ となった。

管中混合固化処理工法の配合設計<sup>3)</sup>は、許容応力度設計法に基づき不良率、変動係数、強度比を設定して現場配合強度を算定した（表-1）。

不良率は、現場処理土の一軸圧縮強さが設計基準強度を下回る割合と定義され、許容できる不良率は処理土の利用目的に応じて設定される。過去の事例では、埋立や裏埋として用いた場合（地盤として評価）、管中処理土の不良率は25%と設定している。覆土部の強度は、設計基準強度を下回る割合が少ないことが望まれ（構造体として評価）、埋立や裏埋よりも不良率が低いことが要求される。浅層改良および深層改良による改良土の一軸圧縮強さのバラツキを調査した資料によると、不良率を考慮した係数 $\alpha$ は1.2～1.3となり、不良率に換算すると約10%となる。よって、試験施工において覆土部の不良率は10%とし、中仕切堤部の不良率は25%と決定した。

処理土の強度のばらつき（変動係数 $v$ ）は「技術マニュアル<sup>3)</sup>」より $v=0.35$ とした。強度比 $\beta$ は現場平均強度と室内配合強度の比で表され、陸上打設の $\beta=0.7$ を用いた。

現場配合強度の算定を行った結果、表-2に示すように中仕切堤部は現場平均強度124.1 kN/m<sup>2</sup>に対して、現場配合強度は177.3 kN/m<sup>2</sup>となり、覆土部は現場平均強度211.0 kN/m<sup>2</sup>に対して、現場配合強度は301.4 kN/m<sup>2</sup>となった。

表-1 設計基準強度と現場平均強度

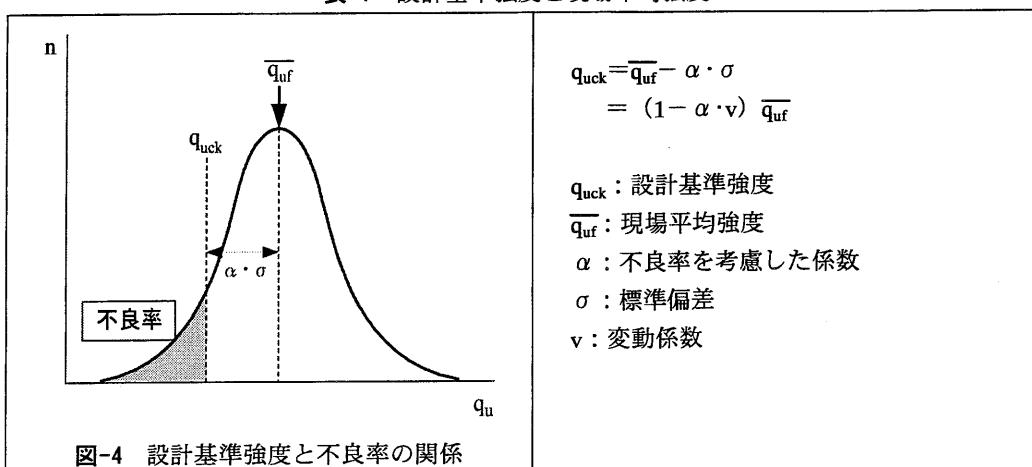


図-4 設計基準強度と不良率の関係

表-2 現場配合強度の算定

◆中仕切堤部	◆覆土部
① 設計条件	① 設計条件
設計基準強度 : $q_{uck} = 95 \text{kN/m}^2$ (3日)	設計基準強度 : $q_{uck} = 115 \text{kN/m}^2$ (28日)
強度比 : $\beta = 0.70$	強度比 : $\beta = 0.70$
不良率 : $25\% \rightarrow \alpha = 0.67$	不良率 : $10\% \rightarrow \alpha = 1.30$
変動係数 : $35\%$	変動係数 : $35\%$
② 現場平均強度 $\bar{q}_{uf}$ の設定	② 現場平均強度 $\bar{q}_{uf}$ の設定
$q_{uck} = (\bar{q}_{uf} - \alpha \cdot \sigma) = (1 - \alpha \cdot v) \bar{q}_{uf}$	$q_{uck} = (\bar{q}_{uf} - \alpha \cdot \sigma) = (1 - \alpha \cdot v) \bar{q}_{uf}$
$= 95 / (1 - 0.67 \cdot 0.35)$	$= 115 / (1 - 1.30 \cdot 0.35)$
$= 124.1 \text{kN/m}^2$	$= 211.0 \text{kN/m}^2$
③ 現場配合強度 $q_{um}$ の設定	③ 現場配合強度 $q_{um}$ の設定
現場平均強度は $\bar{q}_{uf} = 124.1 \text{kN/m}^2$ ,	現場平均強度は $\bar{q}_{uf} = 211.0 \text{kN/m}^2$ ,
陸上打設における強度比 $\beta = 0.7$ であり、	陸上打設における強度比 $\beta = 0.7$ であり、
$q_{um} = \bar{q}_{uf} / \beta = 124.1 / 0.7 = 177.3 \text{kN/m}^2$	$q_{um} = \bar{q}_{uf} / \beta = 211.0 / 0.7 = 301.4 \text{kN/m}^2$

### 3.2.2 現場配合の決定

管中混合処理土の原料土に用いた浚渫土の物性を表-3に示す。浚渫土の特徴として、粘土分が61.3%と多く、液性限界が177.5%と非常に高い。よって、処理土の流動性を高めるためには、相当量の加水が必要となると思われる。

表-3 浚渫土の土質特性

土粒子密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	自然含水比 $w_0$ (%)	粒度組成 (%)			液性限界 $w_L$ (%)	塑性限界 $w_p$ (%)	塑性指数 $I_p$	強熱減量 Li (%)
		砂	シルト	粘土				
2.615	158.1	11.5	27.3	61.3	177.5	52.9	124.6	11.8

処理土の流動性は、処理土のフロー値にて評価を行うが、処理土のフロー値と固化材添加前の加水調整した送泥土(以下、調整泥土と言う)の含水比とは密接な関わりがある。配合試験時のフロー試験を図-5に示す。中仕切堤の施工においては、流動性を低くして、中仕切堤区域から外へ多く流れ出ないよう施工するために処理土のフロー値を90mmに設定した。一方、覆土部については、覆土区域内に均質に広がるように流動性を高める必要があった。しかし、あまり多くの加水を行うと固化材添加量が多くなるため、覆土部の処理土のフロー値は120mmに設定した。配合試験時のフロー試験では、調整泥土の含水比を液性限界の1.3~1.7倍で設定していたため、調整泥土の含水比の決定では直線近似の式を用いた。中仕切堤および覆土施工時の調整泥土の含水比はそれぞれ260%、370%となった。

それぞれの調整泥土含水比におけるW/Cと $qu$ の関係を求めるに図-6、7のようになり、中仕切堤および覆土それぞれの現場配合強度を満たすW/Cを求め、固化材添加量を算定すると表-4のようになる。

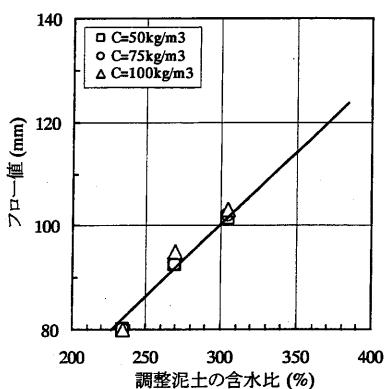


図-5 フロー試験結果

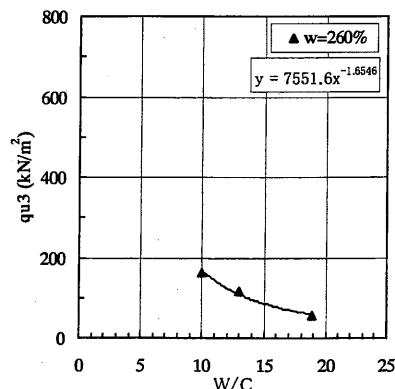
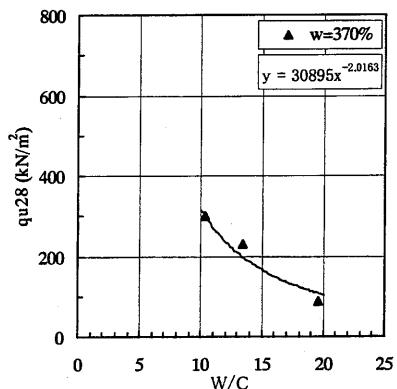
図-6 W/C～ $qu_3$  の関係図-7 W/C～ $qu_{28}$  の関係

表-4 現場配合表

	土粒子密度 $\rho_s$	地山含水比 $w_0$	送泥土含水比 $w_a$	処理土のW/C	処理土含水比 $w_b$	固化材添加量	
						kg/地山m <sup>3</sup>	kg/処理土m <sup>3</sup>
中仕切堤部	2.615	158.1	260	9.654	223.0	156.7	91.1
覆土部	2.615	158.1	370	9.937	290.9	215.9	91.8

## 4. 試験施工

### 4.1 試験施工方法

#### 4.1.1 中仕切堤の施工

中仕切堤の施工は、築堤幅 5m、築堤層厚 2.2m を確保するように、減勢サイクロンによる打設方法と直吹き配管による打設を併用して行った。減勢サイクロンによる打設では、高含水比の超軟弱地盤上で処理土を打設し移動できるよう、牽引可能なフロータ上に簡易サイクロンを設置した泥土打設装置を使用した。施工概要図を図-8 に、施工状況を写真-1 に示す。減勢サイクロンだけ使用して打設する場合、中仕切り堤厚を確保するには相当の裾の広がりを許容しなければならない。今回は減勢サイクロンを使用して打設した後、半日～1 日程度養生し、強度発現を待ってから直吹きによる打設を行うことで、裾の広がりを極力抑えて中仕切り堤厚を確保した。裾の広がり部分は、処理土の固化後にバックホウを用いて整形を行った。

#### 4.1.2 覆土部の打設

中仕切り堤の打設後、改良区域全体に土木シートを敷設し覆土部の打設を行った。覆土部の打設は、中仕切り堤よりも流動性を上げて均一に打設して行くのが理想であるが、原泥の液性限界が非常に高く、処理土の流動性が上がらないため、打設した処理土をバックホウにより広げる方法および直吹きによる打設方法にて施工した。施工概要図を図-9 に、施工状況を写真-2 に示す。覆土の打設を始める前に、打設厚管理のため土木シート上に沈下板を 6 点設置し、各沈下板の位置にて覆土厚を 1.0m 以上確保するまで処理土の打設を行った。覆土施工時に、側方流動などによって中仕切堤が変位することが考えられる。よって、施工時の安全確認のために、中仕切り堤の変位挙動を測定した。また、覆土打設部に設置した沈下板によって、土木シートの沈下量の計測もあわせて行った。

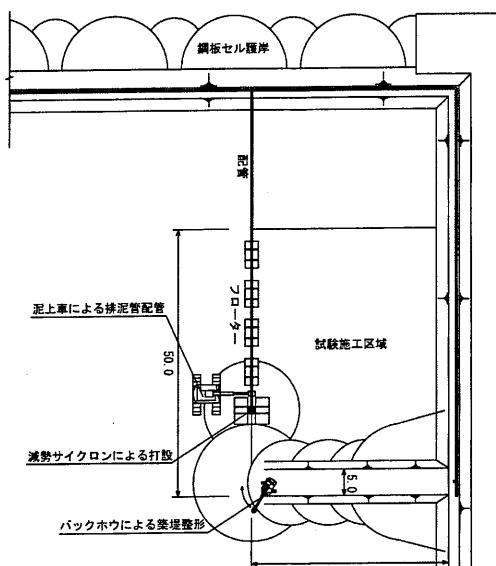


図-8 中仕切堤施工概要図

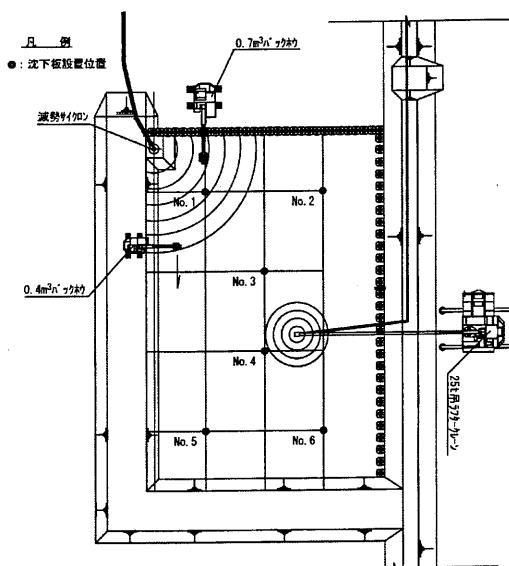


図-9 覆土部施工概要図



写真-1 中仕切堤施工状況



写真-2 覆土部施工状況

## 4.2 試験施工計測結果

試験施工においては、本施工に向けて、設計、施工に関する各種データの計測・収集を行った。試験施工より得られた知見を以下に述べる。

### 4.2.1 覆土施工時の動態観測結果

覆土施工時に、側方流動などによって中仕切堤が変位することが考えられる。よって、施工時の安全確認のために、中仕切り堤に設けた測量杭①～⑧によって変位挙動を測定する。また、覆土打設部に設置した沈下板⑨～⑭によって、土木シートの沈下量の計測もあわせて行った。測定方法は、中仕切堤上に測量杭を設置し、トランシットを用いて計測を行った。また、沈下板についても外周築堤上からレベルにて土木シート面の変位を測定した。

図-10に覆土施工時の測量杭動態観測結果を示す。覆土の施工前と施工完了後を比較すると、中仕切堤は、覆土の施工によって全体的に外側へ変位しており、その築堤変位量は、33.8～93.3cmであった。

また、図-11に覆土打設前後における沈下板位置の土木シート面の高さの変化を示す。土木用シートを用い覆土施工を行うことにより、施工前に低かった沈下板⑩は上がり、高かった沈下板⑨、⑬および⑭については下がるなど、覆土施工により処理土の下端面が平均化されて、軟弱地盤上に均一な層厚の固化版を確保するために土木用シートを用いることが有効であることが確認された。

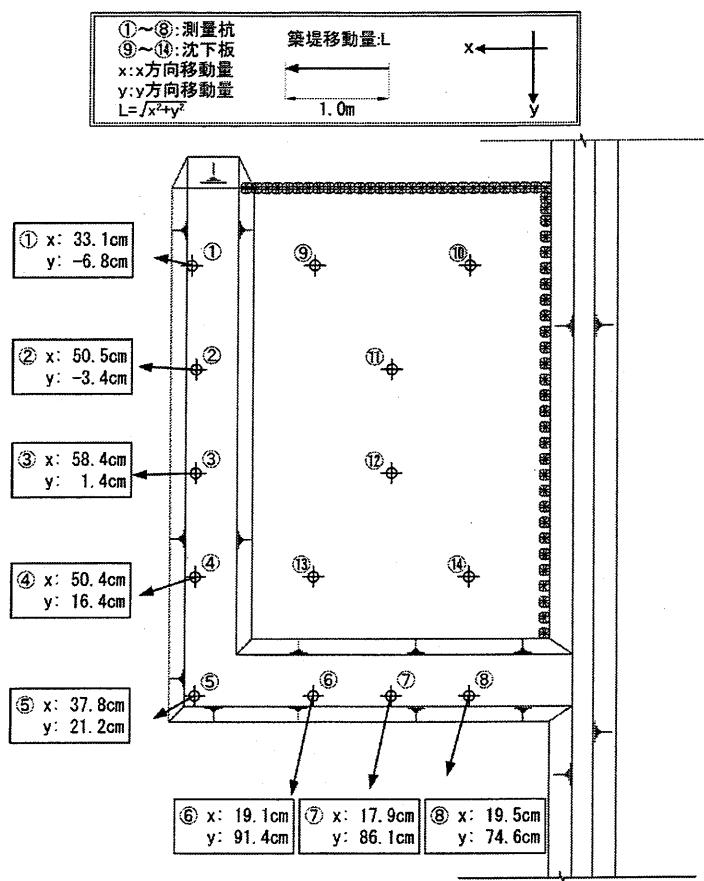


図-10 動態観測結果図（施工前～施工完了時）

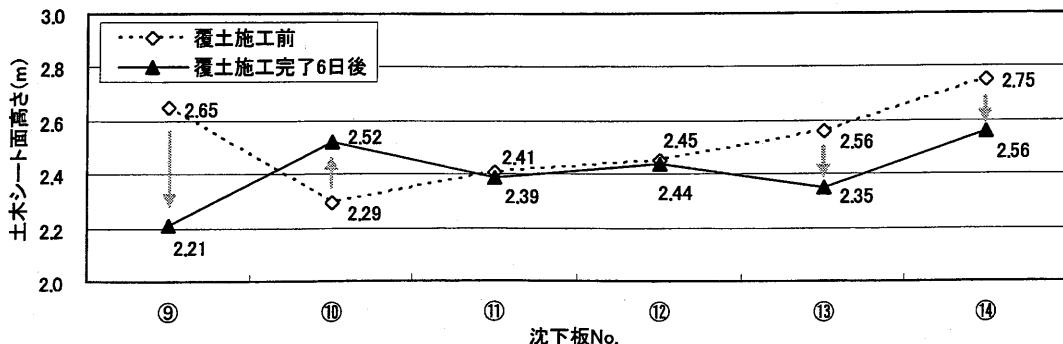


図-11 土木シート面の高さの変化（施工前～施工完了 6 日後）

#### 4.2.2 管中混合固化処理土のフロー試験およびモールドの一軸圧縮試験結果

管中混合処理土を打設直後にモールド容器に採取し、フロー試験および一軸圧縮試験を行った。試験結果について表-5に示す。覆土部の目標フロー値を120mmになるように加水を行い、処理土の打設を行ったが、実際のフロー値は98～110mmであり、流動性の確保が困難であった。処理土の法勾配を試験施工時に計測した結果、約1:20であり、覆土部の施工において打設した処理土をバックホウにより広げる方法および直吹きによる打設方法にて施工する必要があった。本施工においては、浚渫範囲が広範囲であり、浚渫土の土質変化によって流動性が変化することが想定されたので、施工中のフロー試験結果を踏まえて送泥土の含水比を管理した。

表-5 フロー試験および一軸圧縮試験データ（覆土部）

採取時期	送泥 含水比 (%)	フロー値 (mm)	湿潤密度 (g/cm <sup>3</sup> )			一軸圧縮強さ (kN/m <sup>2</sup> )	
			混練 直後	材令 7日	材令 28日	材令 7日	材令 28日
3/29	367	105.0	1.275	1.273	1.289	267.3	514.3
3/30AM	372	110.0	1.274	1.285	1.254	181.0	341.7
3/30PM	371	105.0	1.287	1.292	1.266	233.0	504.0
3/31	373	98.0	1.284	1.297	1.281	198.0	386.0
4/1 AM	378	98.0	1.269	1.284	1.272	258.7	516.3
4/1 PM	382	108.0	1.262	1.253	1.239	191.7	382.3
平均	373.8	104.0	1.275	1.281	1.267	221.6	440.8

#### 4.2.3 覆土部の層厚およびサンプリング試料の一軸圧縮試験結果

覆土部の施工完了後から、覆土（固化版）の強度について、代表6地点にてコアサンプリングを行い、各地点にて、上層、中層、下層の3深度で一軸圧縮試験用の供試体の採取し、一軸圧縮試験を行った。

また、コアサンプリングと同時に12地点において動的コーン貫入試験を行い、覆土厚さの分布の測定を行った。貫入試験地点および試料採取地点について図-12に示す。貫入試験から求められた層厚分布について表-6に示す。覆土打設区域内に設けた6つの沈下板をもとに層厚管理を行った結果、処理土層厚は表-6に示すように平均で約1.5mとなった。

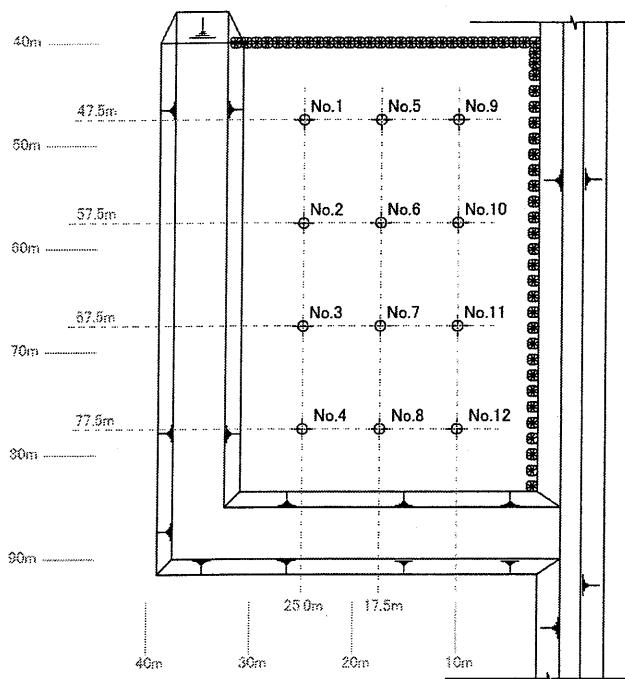


図-12 調査位置図

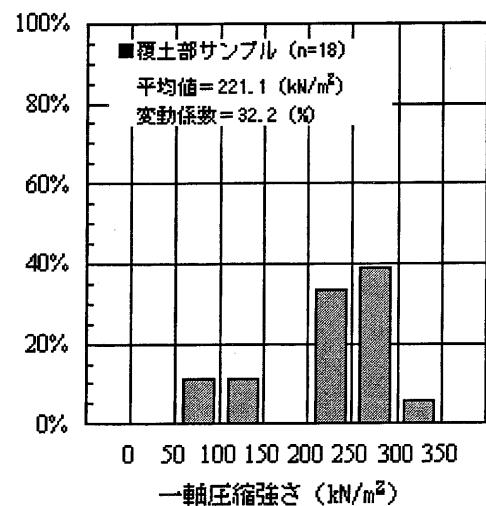


図-13 一軸圧縮強さのヒストグラム

表-6 層厚分布

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	平均
層厚(m)	1.24	1.64	1.40	1.20	1.62	1.65	1.50	1.80	1.20	1.38	1.52	1.85	1.50

表-7 原位置サンプリング試料（覆土部）の一軸圧縮試験データ

ボーリング位置	サンプリング位置	一軸圧縮強さ (kN/m <sup>2</sup> )	湿潤密度 (g/cm <sup>3</sup> )	含水比 (%)	
No.1	上層	266	266.7	1.246	185.1 179.0 178.6
	中層	256		1.263	
	下層	278		1.238	
No.4	上層	210	224.7	1.231	196.3 193.0 182.0
	中層	214		1.233	
	下層	250		1.248	
No.6	上層	208	248.3	1.232	190.9 193.2 184.3
	中層	252		1.236	
	下層	285		1.225	
No.7	上層	261	233.7	1.256	183.3 185.8 177.3
	中層	291		1.256	
	下層	149		1.254	
No.9	上層	201	172.9	1.248	184.4 189.9 187.2
	中層	226		1.255	
	下層	91.8(貝殻含)		1.253	
No.12	上層	51.9(貝殻含)	180.3	1.238	204.1 191.7 182.8
	中層	344		1.254	
	下層	145		1.234	
平均 (n=18)		221.1	1.244		187.2

サンプリング試料の一軸圧縮試験結果を表-7に示す。また一軸圧縮強さのヒストグラムを図-13に示す。No.9の下層およびNo.12の上層において115kN/m<sup>2</sup>を下回る結果があるが、全体として設計基準強度を上回る結果となった。No.9の下層およびNo.12の上層については、せん断破壊面に浚渫土に含まれていた貝殻が存在した影響と考えられ、破壊面以外の部分は十分に強度があり、固化版全体としては問題ないことが確認された。本施工時において浚渫土砂に著しく貝殻が含まれる場合には固化処理に用いないなどの配慮が必要であると思われる。サンプリング試料の一軸圧縮強さの平均値は221.1kN/m<sup>2</sup>であり、配合設計時に設定した現場平均強度211.0kN/m<sup>2</sup>とほぼ一致する結果となった。また、各位置における上層部は直吹き打設による処理土であるが、サイクロン打設による処理土強度と比較して強度発現には問題ないことが確認された。

#### 4.3 試験施工結果まとめ

試験施工より得られた知見をまとめると、以下のようなになる。

##### (1) 中仕切堤の施工

中仕切堤部および覆土部の施工において、処理土の層厚を補うためや築堤を整形する上で不足する処理土量を補うために直吹きにて処理土の打設を行うことは有効であった。直吹き打設は、減勢サイクロンを用いて打設した処理土上に打設しており、直吹き打設による処理土の品質は、材令28日におけるサンプリングによる一軸圧縮試験結果より問題ないことが確認された。

##### (2) 覆土の施工

処理土フロー値120mmを目標に加水を行い処理土の打設を行ったが、実際のフロー値は98~110mmであり、流動性の確保が困難であった。処理土の流動性が低いため減勢サイクロンによる打設でカバーできない部分への直吹き打設は非常に有効である。覆土の層厚については、処理土の法勾配が約1:20となることから、最低1m確保するためにはある程度の層厚の割増し打設は必要となると思われる。覆土打設区域内に設けた6つの沈下板をもとに層厚管理を行った結果、処理土層厚は表-6に示すように平均で約1.5mとなり約5割の割増しとなった。

##### (3) 土木シートについて

土木用シートを用いることによって、処理土と粘土の混合の防止(分離)、処理土の局部的なめり込みの抑制、および処理土の下端面の平坦化などがなされており、処理土の均一な層厚確保のためには土木用シートは不可欠である。

##### (4) 覆土施工時の動態観測

施工前と覆土施工完了後を比較すると、中仕切堤は覆土の施工によって全体的に外側へ変位しており、その変位量は33.8~93.3cmであった。本施工では複数に区切った施工区域で荷重バランスよく覆土を行い、中仕切堤の変形を少なくする必要がある。

## 5. おわりに

試験施工の結果をふまえて、本施工の施工検討を行った。本施工についても、固化版施工区域内を管中混合固化処理土を用いた中仕切堤にて6ブロックに仕切った後、土木シートの敷設を経て、管中混合固化処理土による覆土の打設を行う方法を採用した（図-14 参照）。

また、本施工においては、試験施工時に、覆土部の現場平均強度について良好な結果が得られたことから、配合設計において不良率を10%から25%に見直しを行い、施工を行った。

本施工は、約21,000m<sup>2</sup>の覆土施工を約2ヶ月の短期間にて無事施工を終えることができた。

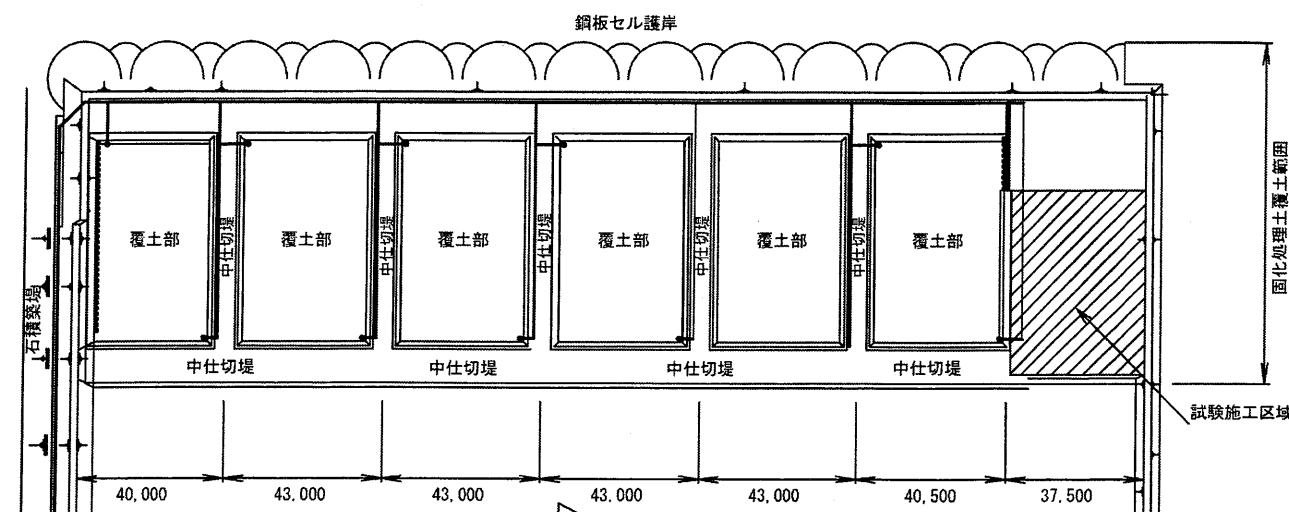


図-14 本施工計画平面図



写真-5 試験施工完了

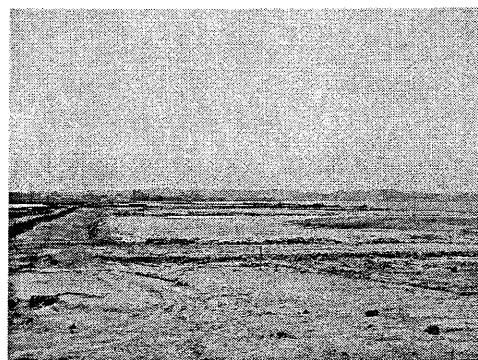


写真-6 本施工固化版

謝辞：本工事の施工方法の検討および施工全般について適切な御指導、御指摘を頂いた国土交通省北陸地方整備局金沢港湾・空港整備事務所に謝意を表します。

## 参考文献

- 1)沿岸開発技術研究センター：管中混合固化処理工法 技術マニュアル、2001, 55p.
- 2)産業技術サービスセンター：斜面・盛り土補強土工法技術総覧、1995、439p.
- 3)沿岸開発技術研究センター：管中混合固化処理工法 技術マニュアル、2001, 15p.