

中部国際空港埋立用地造成への 管中混合固化処理工法の適用

佐藤 恒夫¹

¹正会員 工修 (独)港湾空港技術研究所 海洋・水工部 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

E-mail: satoh-t@pari.go.jp

2000年8月に現地着工した中部国際空港の建設地は愛知県常滑市沖合の伊勢湾海上で、その用地造成にあたっては、良質な土砂の確保が困難になってきていることから、名古屋港の浚渫土を埋立材の一部として有効活用することとした。対象とする浚渫土は軟弱であり、そのままでは埋立地盤の早期供用に適さないことから、セメントを添加・混合する管中混合固化処理工法により改良を行うこととした。今回の空港用地造成における管中混合固化処理工法の適用は、大量の浚渫土を短期間に改良処理する大規模埋立工事として初の事例である。本稿では、配合管理や船団管理などいくつかの新しい取り組みを行いつつ進めてきた工事に関し、本工法の効果、施工管理上の特徴について報告する。

Key Words : sea reclamation, pneumatic flow mixing method, dredged soil, quality control, quality assurance

1. まえがき

中部国際空港は、2005年2月の開港を目標として、その建設工事に2000年8月に着手した。同空港の建設地は愛知県常滑市沖合の伊勢湾海上である。その埋立用地造成に際して、通常の埋立用材である良質な山土に加え、名古屋港の航路・泊地浚渫工事によって発生する浚渫土を埋立材の一部として有効活用することとした。これは、空港用地の埋立造成に際し安価で良質な山土の確保が容易でない中部国際空港と、航路・泊地の整備に際し環境問題等から浚渫土砂の新たな処分場確保がますます困難となっている国土交通省中部地方整備局の間で、双方におけるコスト縮減を含め連携が成立したものである。対象とする浚渫土は軟弱な粘性土であり、2005年開港に向けた短い工期の中では埋立後安価に圧密促進を図り早期供用させることが困難であることから、セメントを用いた管中混合固化処理工法により固化処理することとした。

本工法は、空気圧送中の浚渫土に固化材(セメント)を添加し、空気圧送管内で発生するプラグ流による乱流効果を利用して浚渫土と固化材を攪拌混合するもので、大量急速施工が可能であり、コスト縮減が図れ

るという利点がある。

今回の埋立用地造成工事においては、地山で計画数量約700万 m^3 という大量の浚渫土を約17ヶ月という短期間に改良固化処理することとなった。そのために、船団管理、配合管理、打設管理ならびに環境への負荷軽減などについて、いくつかの新しい取り組みを行い、工事を進めた。

本稿では、2001年6月から2002年10月までに中部国際空港用地造成において採用した管中混合固化処理工法の本格適用による軟弱浚渫土の埋立工事に関し、同工法の効果、施工管理上の特徴について報告するものである。

2. 管中混合固化処理工法の概念

管中混合固化処理工法は軟弱な地盤の固化処理工法の一つであり、類似の工法としては表-1に示す事前混合処理工法、軽量混合処理土工法、深層混合処理工法がある^{1)・2)}。

表-1 固化処理工法の分類

工 法 名		適応土質 (地盤)	混 練 り 方 法
軟弱土固化 処理工法	管中混合方式(管中混合処理工法)	粘性土	空気圧送のプラグ流を利用した管中混合
	プラント混合方式	粘性土	混練りミキサによる機械式混合
事前混合処理工法		砂質土	ベルトコンベヤ上での混合(ドライ方式)
			混練りミキサによる混合(ウェット方式)
軽量混合処理工法(SGM)		粘性土	混練りミキサによる混合
深層混合処理工法(CDM)		粘性土および 砂質土	原位置での攪拌翼による混合

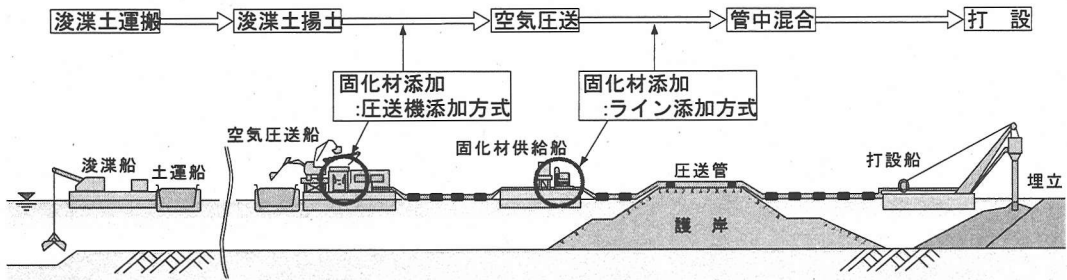


図-1 管中混合固化処理工法の施工概念図

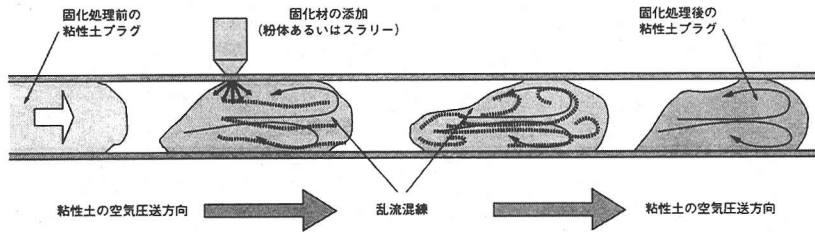


図-2 プラグ流と混練り効果の概念図

管中混合固化処理工法は、図-1に示すように土運船から揚土した浚渫土を空気圧送船で圧送する際に固化材を添加し、圧送管内で発生するプラグ流による乱流効果を利用して浚渫土と固化材を攪拌混合する技術である。固化材の添加位置によって2種類の方式があり、圧縮空気の注入前に固化材の添加を行う「圧送機添加方式」と、圧縮空気の注入後に添加を行う「ライン添加方式」とそれぞれ呼ばれている。また、供給される固化材の性状によって、「スラリー添加方式」と「粉体添加方式」に分けられる²⁾。さらに、最近では、できるだけ攪拌混合性能の良い処理土を作製するための施工技術の開発も進められており、固化材添加位置での圧送管の径を拡大して管内のプラグ流を一旦崩壊して液状流としてから固化材を添加する方法、プラグ流の位置を圧送管内の圧力変化の計測から

検知し、プラグ流のみに固化材を添加する方法、さらに混練効果を高めるため圧送管を蛇のように曲がりくねらせる方法などが考えられている。管中混合固化処理工法の特徴として、浚渫土のリサイクルが可能であること、固化材の添加量に応じて任意の強度の材料を短期間で供給することが可能であることが挙げられる。さらに、圧送時に混練りも行うために固化処理設備が簡略化でき、大型の圧送船を用いることなどにより大規模急速施工が可能となる。また、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ため、比較的容易に設備全体を構築することが可能である。

管路輸送においては、粘性土のみの単相流では管内壁との摩擦による圧力損失が大きく、圧送が困難となる場合が多い。空気圧送技術は、このような粘性土に

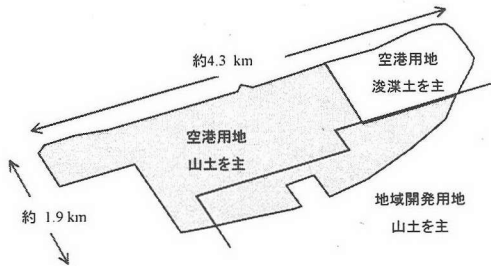


図-3 空港島の全体平面図

対して圧送管内に圧縮空気を注入して粘性土と圧縮空気の混相流であるプラグ流を形成させ、圧力損失を低くして圧送を容易にするものである。圧送管内に圧縮空気を注入すると、管内が粘性土の液相（プラグ）と圧縮空気の気相に分断され、圧縮空気の連続的な供給によって粘性土のプラグが混相流として吐出口へと圧送されることとなる（図-2）。圧送能力は、①圧縮空気量、②圧送管径、③圧送圧力、④粘性土のせん断抵抗などに支配されることが分かっている。

圧送中の粘性土プラグの内部では、図-2に示すように管壁との摩擦によってプラグの形が常に変化し、またプラグの崩壊や再形成が断続的に生じていると考えられる。このプラグの形状変化の結果として、粘性土と固化材の混練効果を得ることができる。すなわち、管内に固化材を添加すると、一定の圧送距離が確保できれば圧送中に固化材との十分な混練効果を得ることができる。なお、混練に必要な圧送距離は、通常50～100m程度とされている^{1)・2)}。長距離圧送にあたっては圧力損失を少なくするように浚渫土の含水比を増加させてせん断抵抗を小さくするか、あるいは圧縮空気量を増やすといった対応が必要になる。

3. 中部国際空港建設への適用

(1) 空港用地埋立造成の概要

2000年8月に現地着工した中部国際空港の建設地は愛知県常滑市の沖合2～3kmの海上で、水深は平均で-6m、最大でも-10m程度の比較的浅い海域である。また、建設地の粘性土層は、一部に最大20m前後の層厚を有するものの、全般的には0～5m程度で、概ね地盤の良い場所である。沖積粘性土の圧密沈下量は最大で2m程度と予測され、サンドドレーン工法による地盤改良を行うことにより開港時の残留沈下は数cm程度以下と予測される。一方、沖積粘性土層の下は岩盤状の常滑層群で構成されており、標準貫入試験による値(N 値)は50以上となっている³⁾。

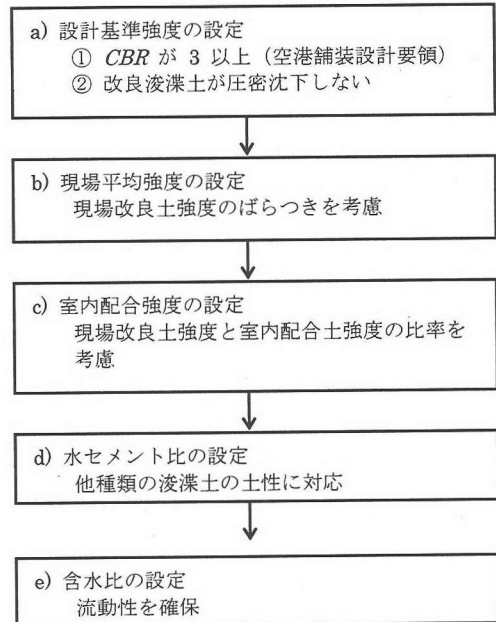


図-4 配合設計検討フロー

空港島の面積は約580haであり、そのうち空港用地が約470haで、残り約110haが地域開発用地となっている。空港用地の造成に要する埋立土量は約5,200万 m^3 であり、そのうち約1,000万 m^3 については、名古屋港の航路・泊地工事によって発生する浚渫土砂を有効利用することとした（図-3）。しかし、従来のように浚渫土をそのまま投入し、覆土した上でプラスチックボードドレーン工法などの圧密促進工法により地盤を改良する方法では、前述のように2005年開港を目指す厳しい工程の下で、約2年で用地造成を完了させることは困難であり、工費も所要の条件を満たさない。そのため、浚渫土砂を埋立地へ投入する際に管中混合固化処理工法で改良することにより、早期かつ安価に所要の強度を有する地盤の造成を図ることとした。今回の浚渫土の有効利用は、環境問題等から浚渫土砂の新たな処分場確保がますます困難となっている航路・泊地の整備側（国土交通省中部地方整備局）と、安価で良質な山土の確保が容易でない空港用地の造成側（中部国際空港㈱）との間で、コスト削減を含め双方の連携が成立したものである。

(2) 管中混合固化処理土の配合設計

管中混合固化処理工法では、セメントの配合量や浚渫土の含水比を調整することで、任意の強度の材料を作製することが可能である。浚渫土を用いた埋立区域の一部は滑走路部にかかっており、適切な強度設定、

配合設定が必要である。本工事での管中混合固化処理土（以下、改良浚渫土という）の配合設計の流れ（図-4参照）を以下に述べる。なお、本工事の発注には、一種の性能発注方式が採用されており、契約上、施工者は一軸圧縮強さなど必要な品質を満足するように自由に設計することができることとなっているが、概ね以下に示すフローに従い配合設計が行われている。

a) 設計基準強度の設定

配合設計においては、まず設計基準強度を設定する。上述のように、埋立区域の一部は滑走路部にかかるため、その路床の下部地盤としての必要強度の確保（条件①）と、改良浚渫土が上載荷重により圧密沈下しない条件（条件②）を満たすように設計基準強度を設定した。

まず、条件①については、空港舗装構造設計要領に基づき CBR 値を3以上と設定した。改良浚渫土の CBR 値と一軸圧縮強さ (q_u) との関係を事前の室内試験で求め、その結果として q_u として 80.1 kN/m^2 の値を得た。

次に、条件②については、改良浚渫土の圧密降伏応力 (p_c) が改良浚渫土層下端での鉛直応力以上であることが必要となる。そこで、荷重が最大となる滑走路部の改良浚渫土層下端 (-7m) での鉛直応力を求めた (148 kN/m^2)。次に、過去の事例から、改良土の圧密降伏応力 (p_c) は一軸圧縮強さ (q_u) の1.25倍という関係¹⁾ が得られており、両者を比較して必要な一軸圧縮強さとして 118 kN/m^2 の値を得た。

上記2つの条件を満たすものとして、 120 kN/m^2 の設計基準強度 (q_{uck}) を設定した。

b) 現場平均強度の設定

現地で打設される改良浚渫土の強度には、比較的大きなばらつきが予想された。現場強度のすべてが設計基準強度を満たすような設計を行うと、非常に強固な地盤が形成されるばかりでなく、不経済なものになる恐れがある。そのため、ここでは不良率の考え方を取り入れることとした。すなわち、現場強度が設計基準強度を下回ることをある程度許容する考えである。改良浚渫土の現場強度分布を正規分布と仮定し、式(1)に示すように現場平均強度から標準偏差 (σ) のある倍数（ここでは α 倍と記述する）を差し引いた値を設計基準強度 q_{uck} とする。このようにすると、不良率は改良浚渫土の現場における一軸圧縮強さが設計基準強度を下回る割合と定義される。

$$q_{uck} = q_{ur} - \alpha \times \sigma \\ = (1 - \alpha \times \nu) \times q_{ur} \quad (1)$$

ここに、

q_{uck} : 設計基準強度

q_{ur} : 現場平均強度

α : 係数

σ : 標準偏差

ν : 変動係数

現場平均強度を決定するためには、不良率と現場強度の変動係数を定める必要がある。 α を大きな値に設定すると、改良浚渫土の現場強度が設計基準強度を下回る可能性は小さくなる反面、現地の平均強度が設計基準強度よりも過剰に大きくなる可能性がある。一方、 α を小さな値に設定すると現場強度が設計基準強度を下回る可能性が大きくなる。本工事では、過去の事例等¹⁾ を参考にして不良率を25%と設定した。その時の α の大きさは0.67となる。また、変動係数 (ν) については既往事例による現地サンプリングの結果を考慮し、35%と設定した。その結果、現場平均強度 (q_{ur}) は式(2)のように与えられる。

$$q_{ur} = q_{uck} / (1 - \alpha \times \nu) \\ = 120 / (1 - 0.67 \times 0.35) = 157 \text{ kN/m}^2 \quad (2)$$

c) 室内配合強度

セメントを固化材とする固化処理工法に関するこれまでの経験から、現場強度は室内配合強度 (q_{ui}) に比較して小さいことが知られている。この原因として、攪拌混合の方法及び程度の違い、養生条件の違いなどが考えられている。管中混合固化処理工法に関する既往事例によれば、室内配合強度に対する現場平均強度の比 (β) は陸上打設の場合で0.7程度、水中打設の場合で0.5とされている⁴⁾。本工事においては、水中打設と陸上打設を明確に区別して施工することができないため、安全側の配慮から一律 $\beta = 0.5$ と設定した。その結果、室内配合強度 (q_{ui}) は式(3)に示すように 314 kN/m^2 となる。

$$q_{ui} = q_{ur} / \beta = 314 \text{ kN/m}^2 \quad (3)$$

d) 水セメント比 (W/C) の設定

後述するように、本工事では名古屋港の12ヶ所で浚渫される土砂が使用された。浚渫土砂の特性は場所により大きくばらつくことが予想され、配合設計にあたっては各土質に適用できる統一的な指標が必要であった。名古屋港浚渫土について室内試験により求めた一軸圧縮強さ (q_u) と水セメント比 (W/C) との関係を図-5に示す (表-2参照)。なお、ここでの水セメント比は、浚渫土砂及び添加するセメントスラリーに含まれる水分を加えた全体の水分とセメント重量との比率で定義している。図-5より、一軸圧縮強さは水セメ

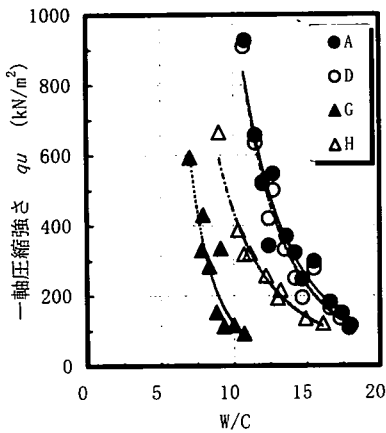


図-5 水セメント比と q_u の関係 (代表例)

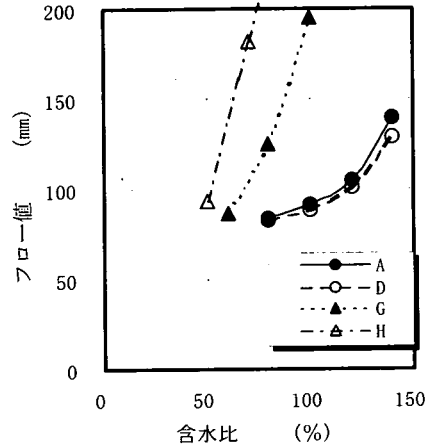


図-6 改良浚渫土の含水比とフロー値 (代表例)

表-2 浚渫土の土性と配合設計

		浚渫場所													
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L		
土性	自然含水比	%	74.6	70.8	70.3	73.6	83.6	74.7	59.3	48.0	64.8	53.8	69.6	67.2	
	粒度	砂分	%	6.9	4.0	8.0	7.7	2.4	2.7	18.0	10.9	7.7	29.3	11.0	17.4
		シルト分	%	46.9	57.0	52.4	42.5	38.2	43.3	50.0	52.8	49.3	34.3	39.0	38.8
		粘土分	%	46.8	39.0	39.6	49.8	59.4	54.0	32.0	36.8	43.0	34.0	50.0	43.8
	液性限界 w_L	%	76.3	73.2	74.3	83.7	88.3	78.3	55.3	57.3	64.8	59.3	77.4	69.3	
	強熱減量値 L_L	%	7.0	5.9	6.8	8.1	7.3	6.5	7.6	5.1	6.0	5.8	7.3	7.3	
配合設計	水セメント比 W/C		14	14	13.4	13.8	13.8	14.1	8.5	11.4	13.8	13.2	13.8	13.8	
	含水比(改良土)	%	105	105	97	113	116	100	98	65	88	80	101	101	
	セメント添加量	kg/m³	54	54	55	56	56	53	87	57	52	53	54	54	

ント比が増加すると低下する傾向が見られる。この関係は、浚渫土の土性によって変化するものの、個々の土性に対しては、ほぼ反比例で低下することが分かった。したがって、浚渫土の土性に基づきその土性分類を判断し、図-5を用いて室内配合強度 (314 kN/m²) に対応する W/C をそれぞれ決定した。

e) 含水比の設定

浚渫土の固化処理にあたっては、適当なプラグ流を発生させるとともに、圧送効率を確保するため混合土の流動性を確保し、せん断抵抗を小さくすることが重要である。一方、出来るだけ多くの浚渫土を処理して埋立地に受け入れることが要請されているため、なるべく加水を少なくする必要がある。配合設計においては両者のバランスのとれた適切な含水比を設定する必要がある。まず、圧送性を最低限確保するための目標フロー値 (JHS A313法) を、これまでの経験に基づき95~100mmに設定した。また、改良浚渫土のせん断強度はフロー値が大きくなると急速に小さくなることが知られている。管中混合固化処理土の含水比とフ

ロー値との関係を図-6に示す。ここでも、土性ごとにユニークな関係が見られる。この関係に基づき、改良浚渫土の含水比を求めた。

f) 配合設計例

d) で設定した水セメント比 (W/C) と、e) で設定した含水比に基づき、セメント量を決定した。浚渫土の土性は浚渫場所によって大きく異なるため、運ばれてくる土運船ごとに現場において浚渫場所を確認して添加セメント量と添加水量を求めた。表-2に浚渫土の土性と配合設計例を示す。

(3) 施工概要

施工状況を図-7に、船団の配置を図-8にそれぞれ示す。本工事では、急速大量施工に対応するため3系統の固化処理船団を投入した。各船団の仕様・能力を表-3に示す。空気圧送船はいずれも国内最大の6,000馬力級で、800m³/hrの圧送能力を有するものである。固化材供給船は2隻で、CP-600と呼ばれる供給船はA、B2系統の船団に固化材を供給した。固化材供給船で

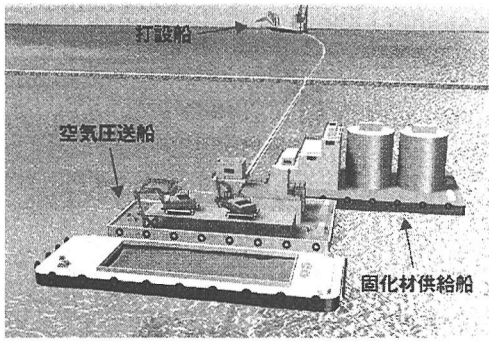


図-7 空気圧送船・固化材供給船・打設船
(イメージ図)

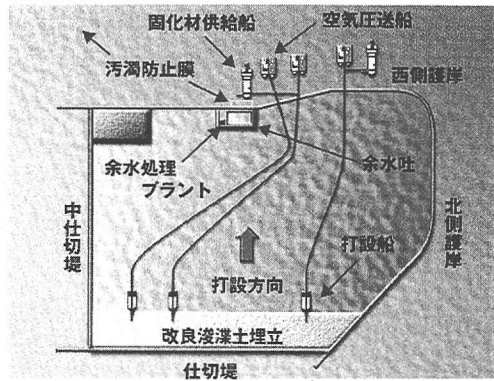


図-8 施工状況 (船団の平面配置図)

表-3 船団の概要

種類	大項目	中項目	A船団	B船団	C船団	
空気圧送船	船名		TOTORAⅢ	AP-1000	風神	
	仕様		6000 馬力級	6000 馬力級	6000 馬力級	
	時間当り能力		800m ³ /hr	800m ³ /hr	800m ³ /hr	
	時間当り空気量	最大		720m ³ /min	750m ³ /min	500m ³ /min
		平均		470m ³ /min	600m ³ /min	500m ³ /min
	圧送方式		加圧ポンプ式	加圧ポンプ式	加圧ポンプ式	
	排砂管径		760mm	800mm	660mm	
	配合管理システム	管理項目		γ線密度計(含水比), 流量計(加水, セメントスラリー, 原料土)		
制御ピッチ			毎秒1回計測, 20秒ごとに平均値をフィードバック			
固化材供給船	船名		CP-600		第八桑平和	
	時間当り能力		100m ³ /hr	100m ³ /hr	100m ³ /hr	
	スラリーW/C		1.0	1.0	1.0	
打設船	船名		野分	迅雷	扇栄	
	打設方式		自然流下	自然流下	ポンプ圧送式	
	時間当り能力		800m ³ /hr	800m ³ /hr	800m ³ /hr	
その他	圧送距離	最大	1552m	1152m	1370m	
		最小	556m	603m	480m	
		平均	1165m	1229m	1067m	

は、水セメント比が1.0のスラリーを作製し、送られてくる浚渫土に添加、供給した。打設船は本工事に新造したもので、打設方式はA、B船団の2隻が自然流下方式、C船団の1隻がポンプ圧送方式である。自然流下方式は、サイクロンと呼ばれる装置で高圧空気を解放した後、圧送された改良浚渫土を自重で流し込む方式である。一方、ポンプ圧送方式は、圧送されてきた改良浚渫土を一旦タンクに受けた後に、ポンプで再度送り出しトレミー管を通して打設する方式である。いずれも海面下-8mから海面上+2.5mまでの改良浚

渫土の打設が可能である。また、いずれの打設船もスパッドを用いたスイング移動方式を採用しているため、アンカーの打ち変えなしで広範囲の打設が可能となっている。

本工事の施工及びその管理フローは次の通りである。まず、名古屋港から運航されてきた土運船は空気圧送船に接舷され、土量の検収と浚渫場所の確認を行う。浚渫土砂を搬送する土運船は2,000~3,000m³積級で、1系統1日あたり3~4隻、3船団合計で11~12隻が運行された。浚渫土の土性は、あらかじめ把握して

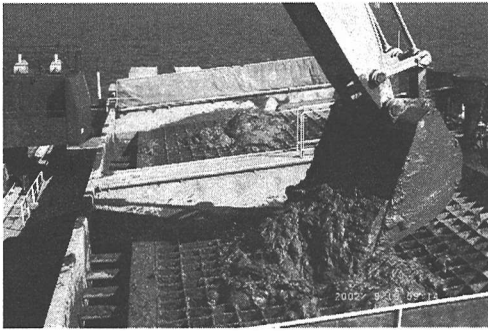


図-9 空気圧送船への土砂投入状況

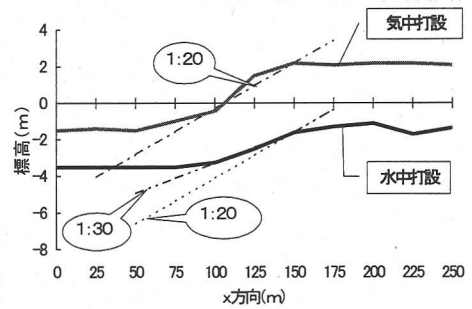
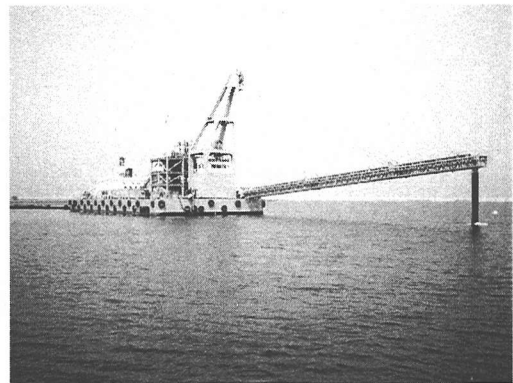


図-11 出来高断面図の例



(a) 自然流下方式



(b) ポンプ圧送方式

図-10 管中混合固化処理打設船

いる浚渫場所と土運船内での含水比により判断した。次に、土運船内の浚渫土を空気圧送船のバックホウで十分攪拌解泥した後に、空気圧送船のホッパーへ投入した(図-9)。その際、浚渫土中の障害物はスクリーニングで除去された。障害物を除去された浚渫土は、目標フロー値(90~100mm)となるように、空気圧送船上の貯泥槽において加水され含水比調整が行われた。なお、加水量の設定では、電磁流量計等により浚渫土の密度と土量を計測管理するほか、打設直前の試料を採取しフロー試験を適宜行って管理している。所定の含水比になった浚渫土は、圧縮空気により排砂管内に圧送される。

次に、固化材供給船で作製されたセメントスラリーが排砂管に供給され、管内で浚渫土に添加される。セメントはあらかじめ計量し、水セメント比が1.0となるように所要の海水と混練して貯留槽に蓄えておき、送泥量及び浚渫土の場所、含水比に応じてセメントスラリーの添加量を管理した。なお、固化材としてのセメントには、環境への負荷を小さくするため、アルカリ性が低く、また六価クロムの溶出傾向が少ないと言

われている高炉セメントB種を採用した。

打設船(図-10)に圧送されてきた改良浚渫土は、2層に分けて打設した。1層目は海底面(平均-5m程度)から-1.5m程度まですべて水中で打設した(水中打設)。その後、2~3日程度養生し、ある程度強度が発現した後に2層目の打設として-1.5mから+2.5mまで連続して打設した(気中打設)。

改良浚渫土の施工は、2001年6月5日から2002年10月11日までの約17ヶ月間に、約700m³/hr、稼働時間16~18時間/日(改良工事時間ほか土運船入れ替え時間などを含む)、すなわち約24,000m³/日のペースで行なわれた。設計では、打設された改良浚渫土の法勾配は水中打設で1:10、気中打設で1:15と想定していたが、結果的には水中部で1:20~1:30、気中部で1:20程度であった(図-11)。2層の改良浚渫土の打設が終了した後、強度発現を待つて山土による覆土を行った。

(4) 施工管理と品質管理

今回の工事では約650万m³もの大量の浚渫土を約17ヶ月という短期間に改良処理し埋立を行う必要が

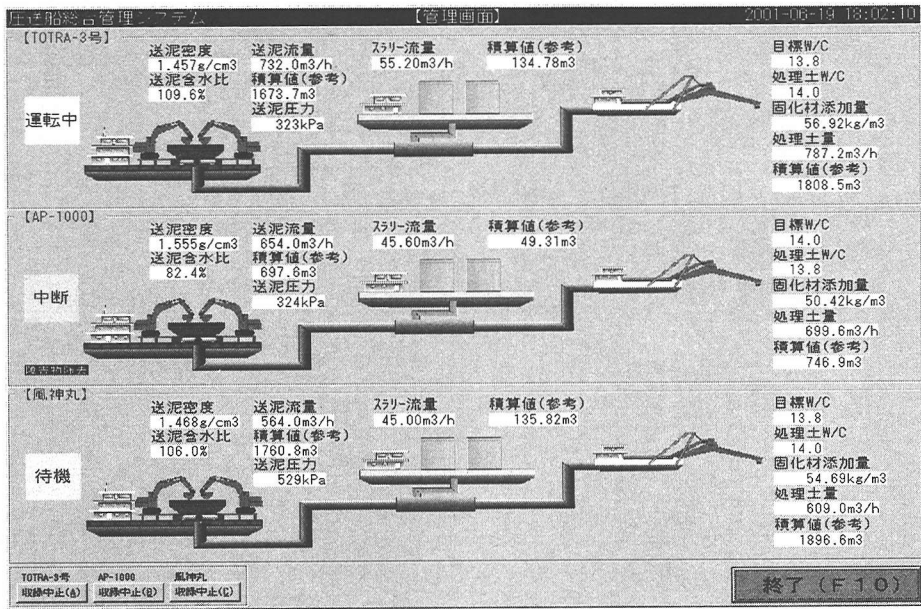


図-12 船団集中管理システム図

あった。そのために、①船団管理、②配合管理、③打設管理、ならびに④環境への影響管理などについて、新しくシステムを構築し、施工管理・品質管理を進めた。

a) 船団管理

浚渫工事は国土交通省中部地方整備局の施工であり、浚渫土は、名古屋港ポートアイランド周辺の浚渫場所（12ヶ所）から空港島まで土運船で輸送された。1日当たりの2,000～3,000m³級土運船の隻数は11～12隻である。本工事では、浚渫土の供給側（港湾）と受取側（空港用地）との間に集積地などのバッファを設けず直接受け渡しを行った。そのため、両者の施工計画を綿密に調整しておくことが必要不可欠であった。そのため、本工事に先立ち国土交通省と中部国際空港線の間で浚渫土の基本供給計画を作成した。この基本計画に基づき、供給側及び受取側の施工者間で原則一週間に一度程度の工程調整会議を開き、週間及び月間の供給計画（土砂運搬船の配船計画）を策定することとした。日々のスケジュール管理の中では、土運船の運行スケジュールを維持することが最も重要で、そのため土運船の配船計画の実行にあたっては浚渫側と無線、電話、ファックスなどにより密に連絡を取り合い、常に作業状況、土運船の運行状況を把握しながら施工を進めた。

さらに、施工中の空気圧送船（3船団）の運転状況を集中管理するとともに、配合の設定ミスなどを防止するため、船団集中管理システムを新たに構築した。

図-12は、新設した船団集中管理システムで、各船団の圧送状況の管理図面を示している。本システムは3隻の空気圧送船のうち「TOTORA III」と呼ばれる空気圧送船に設置されている。画面上には、改良浚渫土の配合目標W/C、各圧送船の送泥状況（湿潤密度、含水比、流量、送泥圧力）、固化剤供給船のスラリー流量、固化材添加量などがリアルタイムで表示される。

b) 配合管理

今回の工事で使用した浚渫土の基本性状（含水比、密度、砂分含有量など）は、浚渫場所、深さ、仕上げ掘りなどの条件によって大きく異なることが分かった。改良浚渫土の強度がW/Cに大きく依存することから、浚渫土の土性に応じて所定の強度、流動性を確保するために、浚渫土ごとにW/Cに基づき配合を設定することとした。また、浚渫土の性状は改良浚渫土の品質のみならず混合処理の施工性にも大きく影響を与えるため、特定の施工船団ごとに土砂の著しい偏りが生じないように土運船の配船調整を行った。さらに、原料土の含水比は同じ土源でも随時異なっており、土運船内でもばらついている。また、長距離圧送においては、管内圧力を一定レベル以下に管理するために、必要に応じて浚渫土の加水調整も行う必要がある。改良浚渫土の強度を一定に保つには、原料土（加水調整後の浚渫土）の含水比と流量を把握し、適正な固化材添加量の調整を行う必要があった。そこで、今回は、図-13に示すような配合管理システムを新たに開発して現場に適用した。

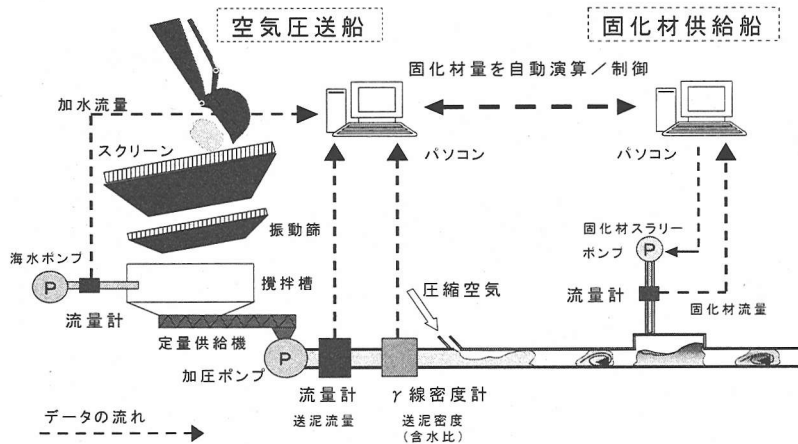


図-13 配合管理システム図

まず、スクリーンを通じて投入された浚渫土は、電磁流量計で流量が、 γ 線密度計で密度が計測される。密度の計測値より単位体積重量を計算し、あらかじめ得ている換算式より含水比を求めた。その後、必要な加水量が計算され浚渫土に加えられる。浚渫土の流量ならびに加水量は電磁流量計で計測した。また、設定含水比を用いて、セメントの添加割合を算出し、電磁流量計で計測された送泥量にあわせてセメントの添加量を計算し、その結果を固化材供給船に送信する。固化材供給船では、送られてきたデータに従い浚渫土にセメントスラリーが添加、供給される。

上記の各測定結果は、20秒ごとに平均値が計算されてフィードバックされ、浚渫土の含水比や流量の変動に自動的に追従できるようになっている。また、送泥流量、加水量、固化材添加量、圧送管内圧力の値はパソコンで管理され、またそれらの値はリアルタイムで圧送船のモニターに表示される。さらに、打設船の上では、圧送管に取り付けたバルブから改良浚渫土を採取し、そのフロー値を測定している。測定結果は空気圧送船に無線で連絡され、目標フロー値(90~100mm)を確保できるように加水量の微調整を行なっている。

図-14に、配合管理システムの稼動状況の一例を示す⁵⁾。ここに示したデータは、1隻の土運船で運ばれてきた浚渫土を対象として、実際の連続施工の中で、どのように配合調整が行なわれ、改良浚渫土が作製されているかの確認を行ったものである。

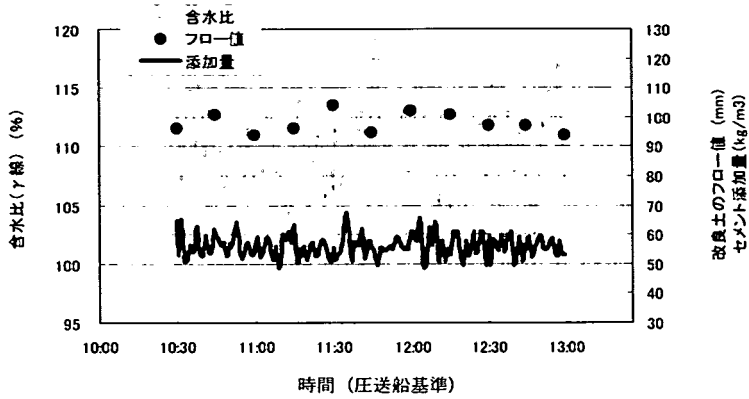
運搬された浚渫土は、表-2に示す土源Aの場所で浚渫されたもので、事前の土質試験から、砂分が約5~11%、液性限界が70~80%と想定された。土運船により空気圧送船まで運搬された時の浚渫土の含水比は、液性限界の1.0~1.3倍程度であった。配合設定は、前

述の手順に従い、設計 W/C が14.0、浚渫土の目標初期含水比が110%、セメント添加量は 55.5kg/m^3 と設定された。なお、圧送距離が約1500mと非常に長いことを考慮して、目標含水比を105%から110%に、目標フロー値を95mmから100mmに変更した。図-14(a)より、圧送船の γ 線密度計から計算された含水比(加水調整後)は全般的に105~115%の間で変化しているが、改良浚渫土のフロー値は目標値(95~100mm)に対してよく管理されていることが分かる。

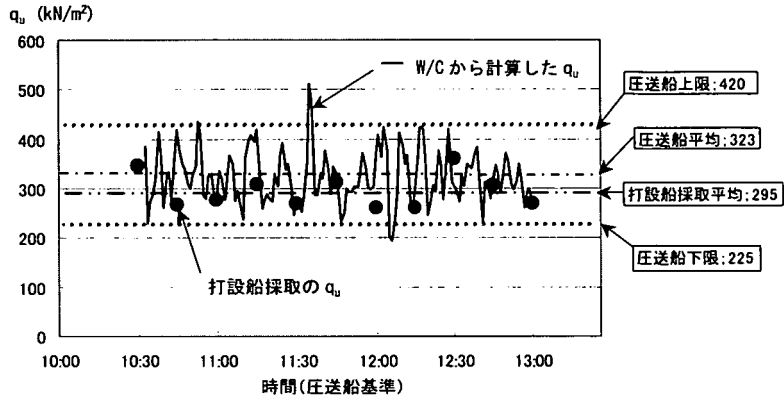
圧送船から約1500m圧送後の改良浚渫土を、現場打設直前の打設船上の圧送管に取り付けたバルブから、15分に1回ずつ採取し、直径5cm、高さ10cmのモールドに詰めフロー試験(JHS A313)及び一軸圧縮試験用の供試体の作製を行った。供試体はラッピング後、室内標準養生(20°C一定)し、材令28日にて一軸圧縮試験を行った。またこれらの結果と、圧送船の配合調整の記録(W/C の実績)から推定される一軸圧縮強さとの比較を図-14(b)に示す。図には圧送船で記録された水セメント比(W/C)の値から、図-5に示す関係を用いて計算された強度、ならびに一軸圧縮試験結果(図中の●印)もあわせて示している。計算による q_u は 225kN/m^2 から 420kN/m^2 の間でばらつく結果となった。一方、実測の強度は、 280kN/m^2 程度から 370kN/m^2 程度の値を示しており、計算値よりも小さいことが分かる。いずれにせよ、両者の値の経時変化は同様の傾向を示しており、両者の平均値の差は小さく、許容できる範囲と評価してよいと考えている。

c) 施工管理

上記の配合管理システムに基づいて作製、打設した改良浚渫土の品質管理は、打設直前と現地打設後について行なった。



(a) 圧送中の含水比，フロー値，セメント添加量



(b) 圧送中のW/Cから計算した q_u と打設船採取試料の q_u の比較

図-14 施工管理結果の例⁵⁾

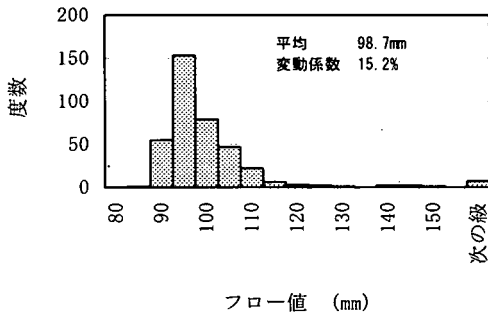


図-15 打設船上で採取した試料のフロー値の度数分布

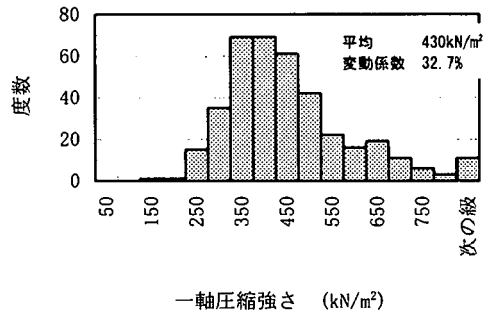


図-16 打設船上で採取した試料の q_u の度数分布

打設直前の改良浚渫土についての品質確認は、フロー値と強度の2つについて行った。まず、フロー値に関しては、打設船上の圧送管に取り付けたバルブから約25,000m³に1回の割合で改良浚渫土を採取してフロー値を確認した。なお、各土運船の入れ替え直後には、5～10分間隔で改良浚渫土を数回採取してフロー

値を測定し、安定状態を確認している。強度管理についても、圧送船上の圧送管に取り付けたバルブから改良浚渫土を約25,000m³に1回の割合で採取し、直径5cm、高さ10cmのモールドに詰め28日間の標準養生の後、一軸圧縮試験を行い、強度（平均値と変動係数）を求めた。

図-15及び図-16は、全施工期間における打設船上で

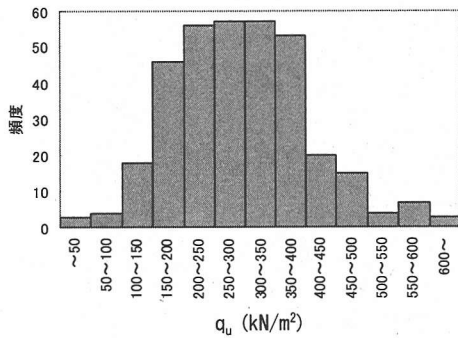


図-17 原位置採取試料の q_u の度数分布

採取された改良浚渫土のフロー値と28日養生後の一軸圧縮強さ (q_u) の結果をそれぞれ示している。まず、フロー値について見ると、得られたデータは80mmから150mm程度にわたって広く分布しているが、その多くは目標値の90~100mm近くに分布しており、平均値は98.7mmと目標通りに打設が行なわれていたことが確認できる。また、変動係数も15.2%と比較的小さいことが確認できる。一方、一軸圧縮強さについての度数分布を見ると、得られた値は150~800kN/m²の広範囲にわたって分布しているが、平均の一軸圧縮強さは430kN/m²で、変動係数は32.7%であった。強度は配合目標強度の314kN/m²に対してやや高め値となっているが、変動係数は32.7%と当初の設定値(35%)とほぼ同程度以下であり、ほぼ目標通りの均一な施工が出来たことが確認できる。

打設後の改良浚渫土については、固化後に二重管スリーブ内蔵式サンプラーを使用してボーリングサンプリングで採取し、材令28日の時点で一軸圧縮試験を実施した。ボーリングは25箇所で行われ、合計343本の供試体について一軸圧縮試験が実施された。ボーリングサンプリングの一軸圧縮強さの度数分布を図-17に、深度方向の分布を図-18にそれぞれ示す。

一軸圧縮強さの度数分布を見ると(図-17)、得られた値は50~600kN/m²の広範囲にわたって分布していることが分かる。その平均の一軸圧縮強さは295kN/m²であり、打設船上で採取された供試体と比べ約69%程度の強度であった。

次に、深度分布について詳細に見ると(図-18)、水中部(堤内水位+1.10m以下の部分)に打設された改良土の一軸圧縮強さの平均値は281kN/m²であるのに対して、気中部に打設された改良土では361kN/m²となっており、打設位置によって強度が異なる結果が得られている。一方、変動係数について見ると、データ全体の値は37.0%と打設船上での採取土の値よりも多少大きな値であった。また、水中部と気中部を比べると、

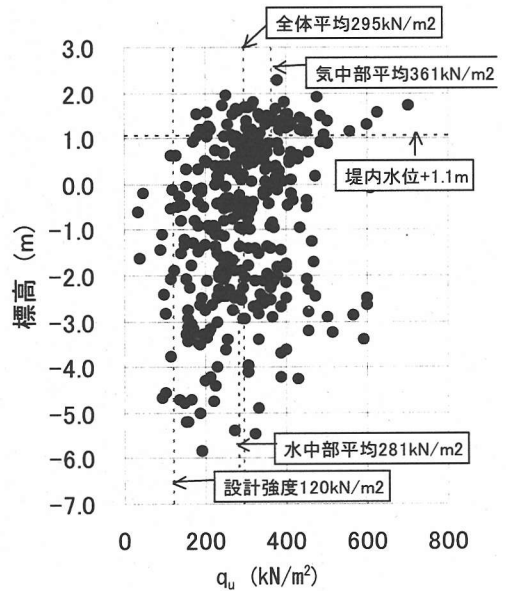


図-18 原位置採取試料の q_u の深度方向分布

水中部での37.6%に対して気中部では28.0%と、水中部の方が大きな値であった。これは、水中部に打設する際に、トレミー管などを用いて静かに打設したにもかかわらず、改良浚渫土内に海水を取り込んだことなどが原因と考えられる。

なお、現場打設後の品質管理基準に関しては、10箇所の地点において、水中部と気中部で試料採取を行い、強度試験を行った。その結果、現場強度の75%以上が設計基準強度 ($q_{urk} = 120\text{kN/m}^2$) 以上であり、品質管理基準を満足する結果であった。

d) 打設管理システム

埋立天端高の設計許容値は、改良浚渫土天端高で±50cm、覆土する山土の天端高で±20cmとした。改良浚渫土の打設中は、測深管理装置(オートレド)を用いて、濁りや気泡に影響されずに安定して水深を自動計測しながら打設高さの管理を行った。また打設船に取り付けたGPSと傾斜計によって計算された打設位置と深度をリアルタイムで管理しながら施工を進めた。これらのデータは、すべて打設船の操作室に集約され、パソコン上にリアルタイムで表示され、オペレータの操船管理や打設管理に活用された。図-19に打設管理システム画面を示す。

次に、打設後の出来型管理は、水中部については、毎日打設終了後に3次元深淺測量システムであるペルガスシステム(GPSとマルチビームソナー測深器)にレド測量、水中スタッフ測量も併用して打設高さ及び打設勾配を計測した。一方、気中部については、

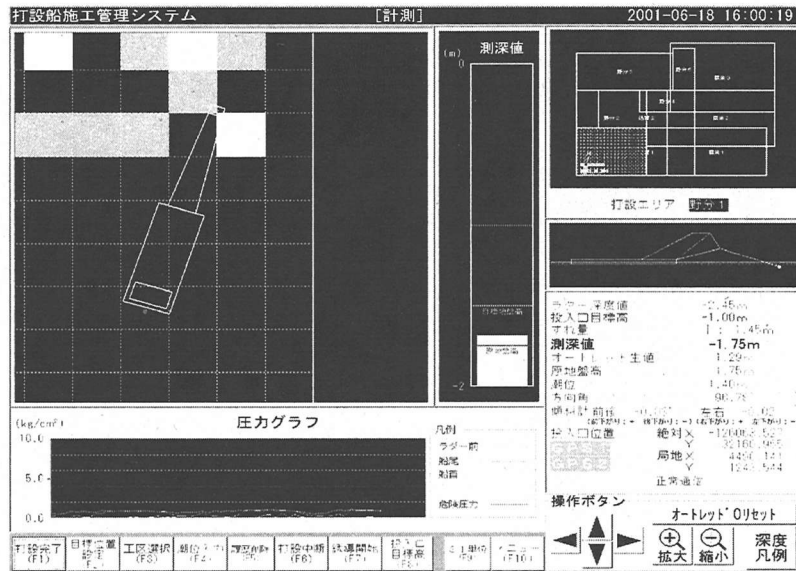


図-19 打設管理システム画面

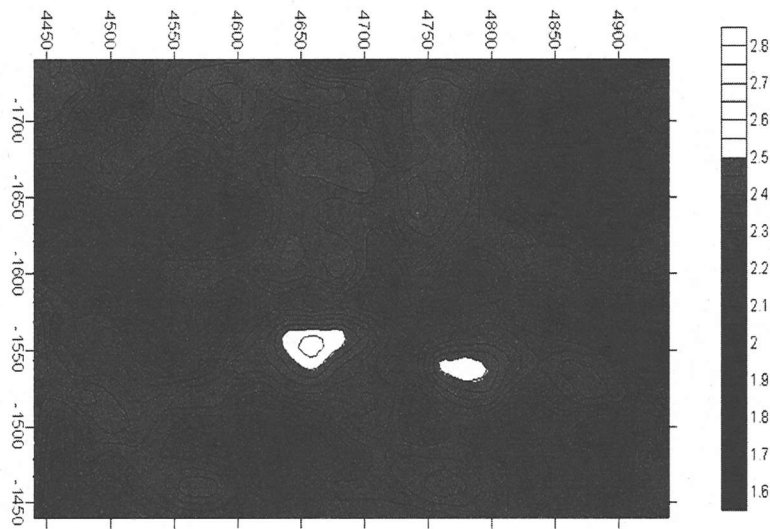


図-20 打設管理システムでの出来型管理図の例

本現場用に新たに開発、採用したGPSを搭載したサンドバギー車を走行させ、走行軌跡上の位置データ、高さデータを把握し、出来型管理を行なった。バギーシステムは今回のように広範囲で不陸が多い改良地盤の出来型管理を迅速かつ正確に行なう上で非常に重要な役割を果たした。このほかには、GPS機器を人の背中に背負い、歩行しながら20mピッチで高さを

計測し、細かい高さ管理やバギーシステムでの測定結果の確認や補間を行ないながら出来型管理を行なった。

図-20は、打設管理システムで打設後の測量結果をコンター図で表示した結果である。この図は300m×500mの範囲を抽出した結果であるが、図中で白ヌキになっている部分が、施工管理上の標高である

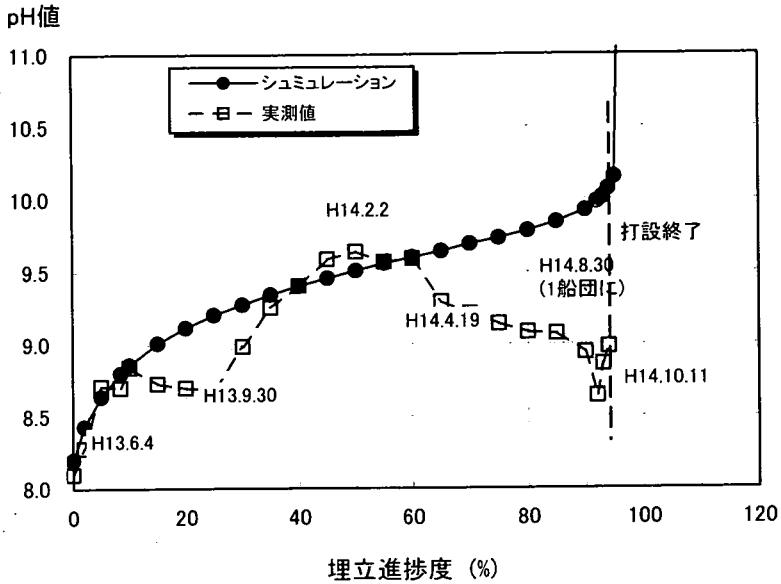


図-21 埋立て地内のpH上昇の予測シミュレーションと実測値の比較

+2.50mを超えた部分として表示されている。このように許容高さを超えた箇所については、上記の背負い式のGPSで細かい確認を行うとともに、材令2～3日程度の若材令時にバックホウで削り、標高の低い部分へ薄層で埋め戻し、転圧する処置を行った。

e) 環境への影響調査

管中混合固化処理工法はセメント系固化処理工法の一つであるため、埋立地内の水中に混入したアルカリ分が余水を介して周辺環境へ悪影響を及ぼすことが危惧された。そこで、本工事においては、埋立地から排出される余水のpHやSSが周辺の海域に影響を与えないように埋立護岸の内側全体に止水シートを張ること、セメントは比較的アルカリ性の低い高炉セメントB種を使用することなどの対策を取った。また、埋立地内からの余水を排水する際には埋立地内で水質監視を行い、必要に応じて炭酸ガス注入による中和処理を行った。さらに、六価クロム溶出⁵⁾に関しても室内配合時と地盤強度確認時に現地サンプルの溶出試験を行い、土壌環境基準を超えないことを確認している。

図-21は、工事中着前に実施した埋立地内のpH上昇の予測シミュレーションと実測値の比較である。予測シミュレーションは、改良浚渫土の打設時や毎日の圧送管の洗浄によって供給されるセメントのアルカリ分が海水に溶解する量を仮定し、それらが打設とともに蓄積することで、pHが上昇する計算を行なったもの

である。

実測値は、埋立進捗度10%程度までは、シミュレーション結果と一致しているが、一旦上昇が止まり、再び進捗度25%程度からシミュレーション結果に追いつくように上昇している。その後、進捗度60%程度から再びpH値は下降し始め、打設終了近くにやや上昇して改良浚渫土による埋立てが終了している。pH値の下降期が夏場であるなどの傾向が伺えるが、改良浚渫土の施工は連続的に行われており、また埋立地内のpH値を低下させる処置などはとりわけ行っていないことから、これらの原因の解明については今後の課題となっている。

(5) 施工時のトラブルなどへの対応

土運船で輸送される浚渫土の中には、土砂以外に石、古タイヤ、自転車や鋼材などの様々な異物が含まれる場合がある。これらは、空気圧送船上のふるいにとどまって施工の効率の低下を引き起こすばかりでなく、時には空気圧送船の機械内部に入り込み、圧送機械の停止あるいは破損を引き起こした。そこで、圧送船のふるいの目を細かくしたり、ふるい上にとどまった障害物をこまめに撤去するなどの措置を講じた。

施工中は、障害物による機械の破損のみならず、電気系統や機械部品の摩耗など様々なシステムトラブルが発生した。あらかじめ予想できるトラブルに対しては予備品を持つことなどにより迅速な対応が可能

なようにした。さらに、トラブル発生時には、揚土作業に支障が出ないように故障した船団から他の船団への土運船の振り替えなどの配船計画の変更を実施した。また、圧送システムを2系統有する船団においては、一方のシステムを稼働しながら故障したシステムの修理を行うなどの対処により、極力圧送作業を止めないように努めた。

今回の施工は海上工事であるため、波浪や風浪に対しても十分な対応が必要であった。作業の中止基準として、風速 10m/s以上、波高1m以上、視程 1000m以下と設定した。台風の接近または通過が予想される場合には、あらかじめ排砂管を切り離して船団を引船で曳航して名古屋港に避難した。空気圧送船(3船団)が避難を開始し台風の通過後作業復帰までに7日から10日程度を要した。また、船団を配置した空港島西側海域は、伊勢湾の東縁に位置しており、冬季にはシベリア寒気団のもたらす強い北西風が吹き付ける場所であり、時には 20m/s以上の風や2m近くの波高もしばしばあった。冬季風浪は台風と異なり、風、波とも来襲方向はほぼ一定であるため、あらかじめ風浪を予測して船団に加わる風力、波力、潮流力をシミュレーションし、風浪に対してアンカー及びシンカー配置を検討するとともに実際にダイバーの調査を行いアンカーの掛かり具合を確認した。

4. 結論

本研究で得られた結論を以下にまとめて示す。

- 1)適切な船団管理、配合管理、品質管理により、計画値860万 m^3 の改良浚渫土を工程通り(2002年10月完了)に竣工することができた。
- 2)一軸圧縮強さについても、現場の施工管理が十分丁寧であったため、設計値(25%)よりかなり低い不良率(7%)を確保できた。
- 3)改良浚渫土の品質(含水比、フロー値等)を見ると、今回採用した配合管理システムが十分機能できた。
- 4)管中混合固化処理工法が、人工島建設に十分活用出来ることが確認できた。

なお、改良浚渫土の一軸圧縮強さは設計値よりやや高めにはらついていた。本工法のさらなる経済性のために、含水比や固化材添加量と強度との関係などについて更なる解明が必要と考えられる。

5. あとがき

管中混合固化処理工法は開発されて間もない新しい工法であるが、その混合性能の良さや経済性などから、今回中部国際空港建設に適用することとした。約17ヶ月にわたる改良浚渫土による埋立工事では、これまで予想出来なかった様々な問題、技術的課題に直面したが、関係者のご協力、ご努力によりこれら課題が解決され、無事施工を完了している。本工法は、従来埋立後の強度発現まで多大なコストと時間を要していた浚渫土の利用方策にひとつの道を開くものである。ここで得られた施工技術、施工管理技術、品質管理技術などのノウハウなどがさらに発展し、今後臨海部の用地造成工事において有効に活用されることを期待したい。

謝辞：本稿を執筆するにあたり、名古屋大学大学院工学研究科浅岡顕教授及び独立行政法人港湾空港技術研究所地盤改良研究室の北詰昌樹室長には懇切なご指導をいただいた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1)運輸省第五港湾建設局中部国際空港調査室：管中混合固化処理工法，p.147，1999。
- 2)(財)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，沿岸開発技術ライブラリー No11，p.127，2001。
- 3)(財)中部空港調査会：中部新国際空港建設予定地における地象調査報告書，pp.8-65，1994。
- 4)佐藤恒夫，川上泰司，北詰昌樹，森 好生，沼尻義春：中部国際空港用地造成への管中混合固化処理工法の適用，(社)地盤工学会 粘土地盤における最新の研究と実際に関するシンポジウム，pp.241-246，2002。
- 5)岩月哲三，坂本明暁，御手洗義夫，佐藤恒夫：中部国際空港空港島造成工事における管中混合処理土工法の適用-W/C \sim q \sim 関係を用いた配合管理システムとその適用性について-，第37回地盤工学研究発表会講演集，pp.881-882，2002。
- 6)三木博史，小橋秀俊：セメント系固化工法と環境問題，基礎工，pp.12-14，2000。

(2003.1.7 受付)

APPLICATION OF PNEUMATIC FLOW MIXING METHOD TO CENTRAL JAPAN INTERNATIONAL AIRPORT CONSTRUCTION

Tsuneo SATOH

Recently, Pneumatic Flow Mixing Method, is developed for sea reclamation and land development, in which dredged clay is mixed with relatively small amount of cement in a transporting pipe. The soil mixture forms several separated mud plugs in the pipe, and is thoroughly mixed by means of turbulent flow during the transporting. This method is applied to construct a man-made island for Central Japan International Airport at Nagoya area. The construction project started in 2000 and will be completed in 2005, where about 10 million cubic meters of dredged soil was stabilized by the method. In this article, the execution technique of the method and its application to the Airport construction project are described in detail.