

礫質土を利用した事前混合処理工法の施工

宮本 健児* 長津 辰男**
 大久保泰宏*** 米谷 宏史***
 新舎 博***

要旨

事前混合処理工法は液状化対策や土圧低減などを目的として、土砂に少量の安定材(セメント等)と分離防止剤を事前に添加・混合し、所定の場所に運搬・投入することで安定した地盤を造成する工法である。

従来、本工法に用いる原料土は細粒分含有率 $F_c \leq 15\%$ の砂質土を対象とし、対象土量が数～数十万 m^3 規模、施工方式は大型プラント+ベルトコンベア形式が採用されることが多かった。

本報は、①泥岩破碎土や礫混じり土など礫質土に適用した施工事例、②狭小な敷地内での施工事例、から得られたデータをもとに、礫質土を利用する際の施工上の留意点や処理土の品質について検討した。

1. はじめに

事前混合処理工法は液状化対策や土圧低減などを目的として、土砂に少量の安定材(セメント等)と分離防止剤を事前に添加・混合し、所定の場所に運搬・投入することで安定した地盤を造成する工法である。¹⁾

本工法は新規に埋立地を造成する場合に、後の地盤改良が不要となるため、比較的安価に短期間で造成できるため、様々な原料土や工事規模に対して適用されるケースが増えている。しかしながら、目標とする品質を満足するための設計手法、事前調査・試験施工方法および施工時の品質管理手法などが、砂質土を除くと十分に確立されていない。

本報は、①泥岩破碎土や礫混じり土など礫質土に適用した施工事例、②狭小な敷地内での施工事例、の結果をもとに、原料土として礫質土を利用する際の施工上の留意点や処理土の品質についてまとめる。

2. 事前混合処理工法の技術動向

事前混合処理工法は、元々砂質土による新設の埋立地の液状化対策を目的として開発された工法である。一般に埋立地の液状化対策は埋立が終了した後に地盤改良工事として行われることが多かった。しかし、埋立材料が液状化を生じると予想される土質である場合には、埋立時に液状化しないように事前に土性改良を行えば、より安価かつ短期間に地盤を造成することができる。

本工法はこのような発想に基づいて開発されたものであり、本工法に用いる原料土は安定材(セメント等)との混合の容易性の観点から細粒分含有率 $F_c \leq 15\%$ の砂質土を対象とし、対象土量が数～数十万 m^3 規模で適用されることが多かった。このような規模の工事には、通常大型の安定材供給プラント+ベルトコンベア形式の施工方式が採用されている。しかし、近年建設発生土の有効利用とコスト低減の観点から、対象土質や工事規模にとらわれずに適用するという事例が増えている。

それに伴い、施工方式(設備)も様々なバリエーションが開発され、多彩な施工条件に対応できるようになってきた。本報で紹介する回転式破碎混合装置や自走式土質改良機もこのような状況で開発・適用されたものであり、現在では適用土質・工事規模に依らず、施工が可能となっている。図-1に各種施工方式の概要図を、表-1に施工方式別の適用土質と工事規模の関係を示す。

これに対して、砂質土以外の原料土に対して用いられた事例は少なく、施工管理手法(調査・

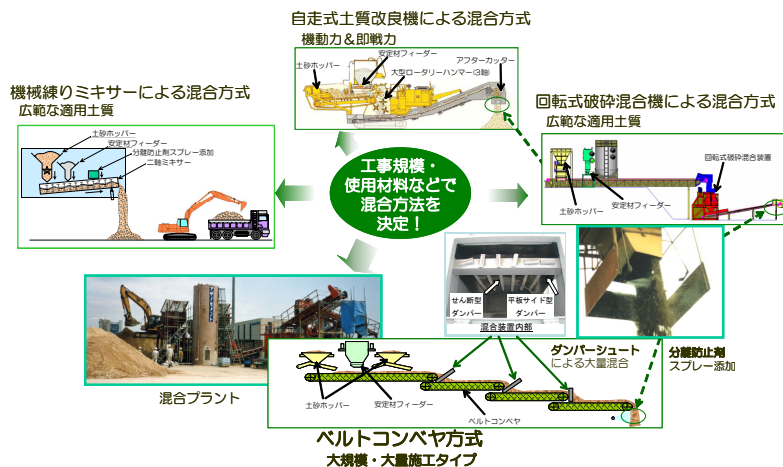


図-1 施工方式概要図²⁾

*大阪支店 **本社土木部 ***技術研究所

表-1 施工規模と適用土質²⁾

施工規模				混合方法	土質区分			
大規模	中規模	小規模	軟弱土		砂質土	砂しき	崖土	
ベルトコンベヤ				軟弱土				
機械掘りミキサー				砂質土				
自走式土質改良機				砂しき				
回転式破碎混合機				崖土				

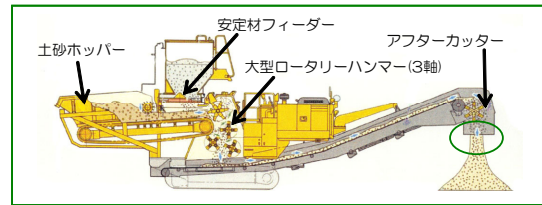


図-4 自走式土質改良機方式 (リテラ60m³/hr級)

設計・品質管理)の確立には未だ施工データが不足している。これらの確立のためには、様々な施工の中でデータの蓄積と分析を継続していくことが必要である。

3. 泥岩破碎土を用いた施工事例

3.1 概要

北海道の羅臼漁港において、液状化防止および土圧低減を目的として直立岸壁背面の腹付土に事前混合処理工法が適用された(図-2参照)。

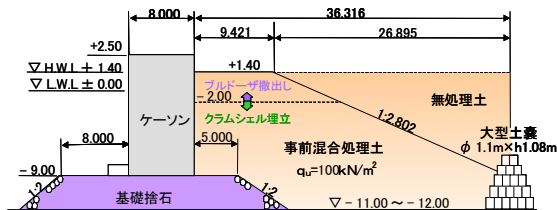


図-2 埋立断面図(羅臼)

今回施工の対象となった原料土は泥岩及び強風化泥岩の混合物である。これを破碎して使用した。当該工事は施工期間が短く、処理土の大量急速施工が必要であったことから、処理方式として回転式破碎混合機方式(以下、施工方式①と記す)と自走式土質改良機方式(以下、施工方式②と記す)の2方式を同時に使用して施工を行った。図-3、4に両施工方式の概要図を示す。

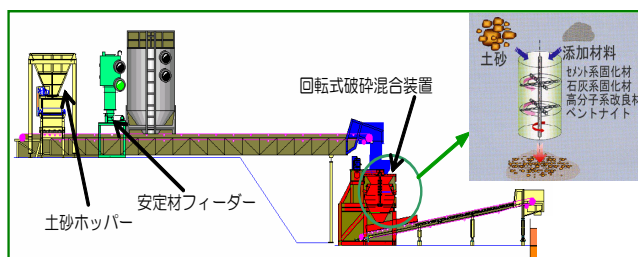


図-3 回転式破碎混合機方式:ツイスター(100m³/hr級)

3.2 施工方法

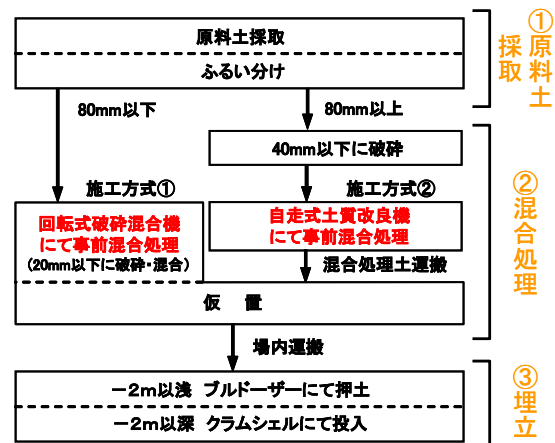


図-5 施工フロー(羅臼)

図-5に施工フローを示す。本工事に用いた原料土は泥岩および強風化泥岩の掘削土で一部人頭大の巨礫が混じる土砂であり、そのまま護岸背面に埋め立てて使用すると液状化が懸念された。また、本工事は元々防波堤だった構造物を護岸として利用するものであり、無処理で埋め立てると土圧が大きく作用して安定が確保できない。以上の理由から、前述の現地発生土を破碎した後、事前混合処理工法を適用して埋め立てる計画となった。施工は原料土を80mmでふるい分け、80mm以下は施工方式①にて20mm以下に破碎し、かつ事前混合処理後に埋め立てた。また、80mm以上についてはインパクトクラッシャを用いて40mm以下に破碎し、その後施工方式②を用いて事前混合処理を行って埋め立てた。

3.3 原料土の土質特性と基本配合

表-2に回転式破碎混合機によって破碎された土砂①、およびインパクトクラッシャによって破碎された土砂②の土質特性を、図-6に粒径加積曲線を示す。前年度の実績³⁾では、上記の土砂を用いて埋め立てた地盤の乾燥密度は1.14g/cm³であった。当工事においても埋立地盤の乾燥密度としてこの値を採用し、この密度に

おける安定材の必要添加量を事前に室内配合試験によって決定した。その結果、土砂①で 9.0%(対乾土重量)、土砂②で 11.0%となった。室内配合試験の詳細については文献⁴⁾を参照されたい。

表-2 使用土砂の物理特性

項 目		①：粒径 20mm以下	②：粒径 40mm以下		
物理特性	土粒子密度	ρ_s (g/cm ³)	2.680	2.641	
	自然含水比	w_n (%)	24.6	21.5	
	粒度分布	礫分		46.6	83.1
		砂分		25.6	13.6
		シルト分		3.0	3.3
粘土分		24.8			
設計値	設計乾燥密度	ρ_{ddd} (g/cm ³)	1.14		
	安定材添加量 (対乾土重量)	C (%)	9.0	11.0	

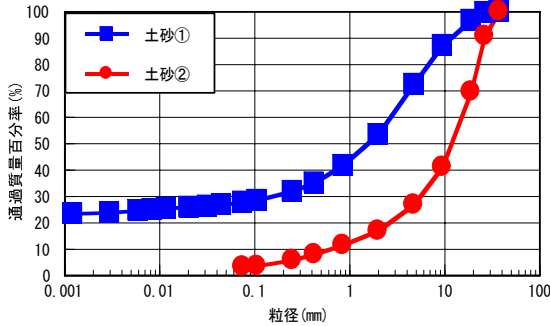


図-6 使用土砂の粒径加積曲線

3.4 処理土の乾燥密度および一軸圧縮強さ

本工事の施工中の品質管理として、処理土 5,000m³に対して 1 回の割合で埋立前の混合処理土をモールドに詰め、乾燥密度 ρ_d および 7 日強度 q_{u7} 、28 日強度 q_{u28} を測定した。又、処理土打設後 2 ヶ月程度経過した時点で、ボーリングにより不攪乱試料を採取し、現場乾燥密度 ρ_{dfr} および現場強度 q_{ufr} を調査している。

施工中のモールド試料の ρ_d および q_{u7} 及び q_{u28} の度数分布を図-7、8、9に示す。モールド試料の乾燥密度が土砂①で平均 1.153g/cm³、土砂②で平均 1.255g/cm³ となっており、最大粒径が大きいと乾燥密度が大きくなる傾向が見られた。材令 28 日の一軸圧縮強さの平均値 $\overline{q_{u28}}$ は土砂①で 235.1kN/m²、土砂②で 510.0kN/m² と目標とする強度を満足しているが、乾燥密度が事前に設定した値よりも大きくなった土砂②の処理土は強度も過大になっていることが分かる。乾燥密度は処理土強度に指数関数的に影響する³⁾ため、経済的な設計を行うためには 0.5~2m³ 程度の土槽を用いて現場乾燥密度を測定する試験施工を事前に行うことが望ましい。

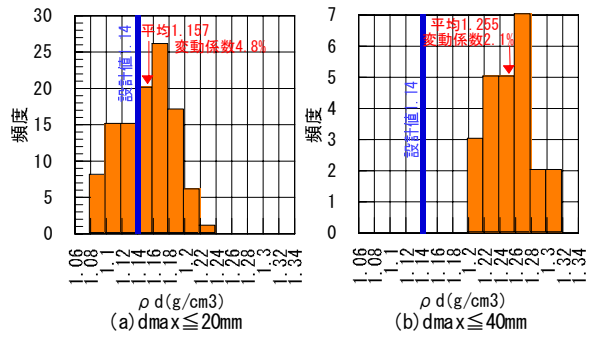


図-7 モールド試料の乾燥密度

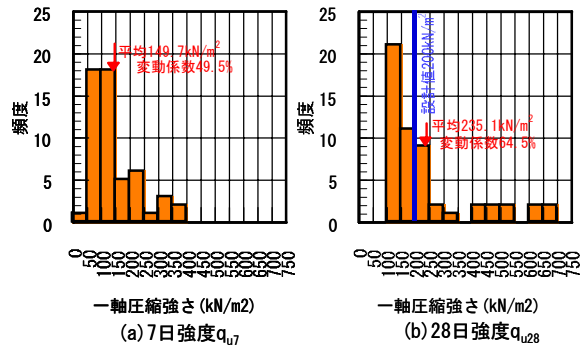


図-8 一軸圧縮強さ(モールド：粒径20mm以下)

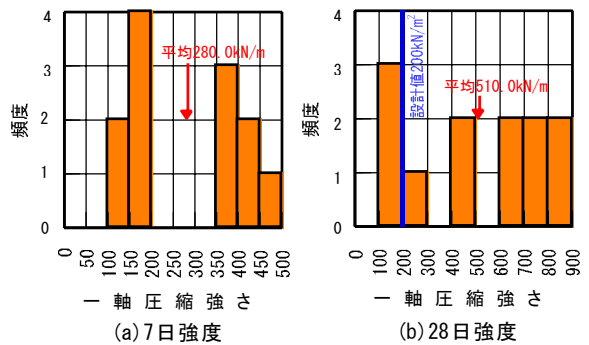


図-9 一軸圧縮強さ(モールド：粒径40mm以下)

また、 q_{u28} の変動係数を求めると土砂①で 64.5% となり、粗粒(礫)分が多い土砂では変動係数が大きくなるという結果が得られた。今回使用したモールドは ϕ 10cm×H20cm の標準的なサイズのものであるが、土砂の最大粒径に応じて大きなサイズのものを使用すれば変動の

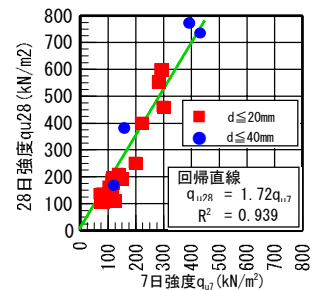


図-10 q_{u28}/q_{u7} (モールド)

少なく精度の高いデータが得られると思われる。

q_{u7} と q_{u28} には明らかに相関が認められ、 q_{u28}/q_{u7} の比の平均を取ると1.72(相関係数0.94)となり、他の固化処理工法と同様、施工中に q_{u7} の結果を用いて q_{u28} を推定することが可能である。(図-10)

処理土打設後2ヶ月程度経過した時点で、ボーリングにより不攪乱試料を採取し、現場強度 q_{udf} および現場乾燥密度 ρ_{ddf} を調査した。結果を図-11、12に示す。本

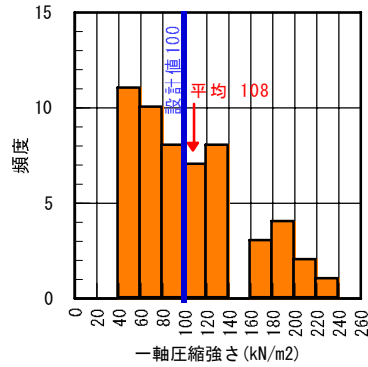


図-11 現場強度 q_{udf}

工事では土砂①と土砂②の処理土を区域分けすることなく同時に埋め立てているため両者の比較はできない。粗粒(礫)土分を多く含む土砂であることから、改良強度のバラツキが

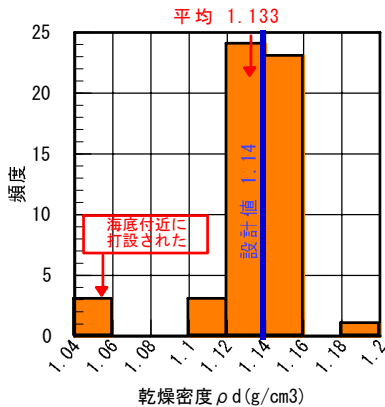


図-12 現場乾燥密度 ρ_{ddf}

大きくなっているが、設計基準強度 $q_{udd}=100\text{kN/m}^2$ に対し、現場の一軸圧縮強さの平均値は $\overline{q_{udf}}=108\text{kN/m}^2$ と所期の

目標強度を達成している。なお、本施工では事前配合試験の室内目標強度の設定時に割増係数 $\alpha=2.0$ とし、室内目標強度 200kN/m^2 となるよう配合を決定している。

現地の処理土地盤の乾燥密度の平均値は $\overline{\rho_{ddf}}=1.134\text{g/cm}^3$ であり、事前に設定した乾燥密度 1.14g/cm^3 にはほぼ近い値となっており、事前の設定値は妥当であったと言えるが、一部、海底原地盤付近に打設されたものに乾燥密度の低いものがあった。打設時に軟弱浮泥を巻き込んでしまったものと思われ、海底付近の浮泥層上に打設を行う際には、通常より丁寧に施工を行って巻き込みを抑制することが望ましいと思われる。

3.5 施工中及び事後調査時の安定材含有量の比較

施工中のモールド試料と事後調査のサンプリング試料を

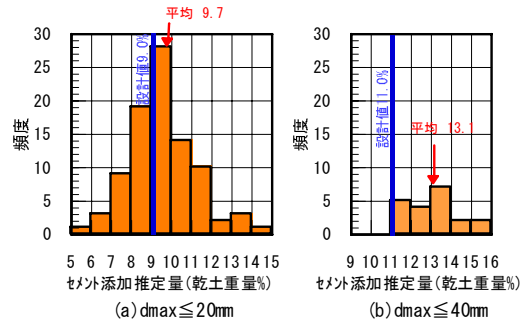


図-13 安定材含有推定量(モールド試料)

用いてカルシウム分析を行い、安定材(セメント)含有率を求めた。その度数分布図を図-13、14に示す。

埋立前の混合処理土では土砂①で9.7%、土砂②で13.1%となり、設計添加量の9.0%、

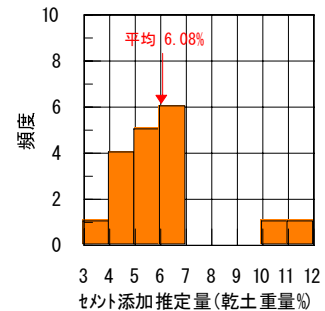


図-14 安定材含有推定量(事後調査)

11.0%とほぼ一致しているが、事後調査サンプルから推定される安定材含有率は6%程度と材料分離による流失が認められる。しかし、平均強度が目標値を満足していることから考えると、事前設計で割増係数 $\alpha=2.0$ を採用したことはほぼ妥当と考えられる。

本施工では前年度の施工結果を参考にして処理土の乾燥密度や割増係数を設定できたことから妥当な設計値を設定することができたが、新規施工場所においては事前に試験施工を行って設計値を定めることが望ましい。

4. 狭小な場所での施工事例

4.1 概要

静岡県 戸田漁港鬼川地区において、液状化対策および土圧低減を目的として事前混合処理工法が適用され

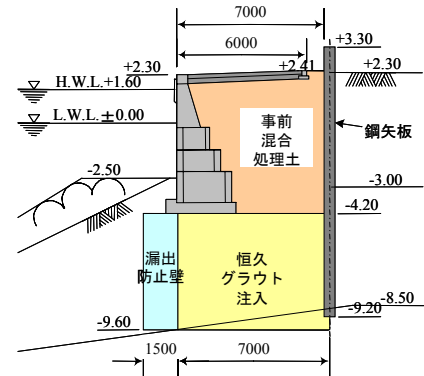


図-15 施工断面図(戸田)

た。図 - 15 に本工事の施工対象断面を示す。本工事は、既設のブロック式岸壁背面の土砂を掘削し、その掘削土および購入土を用いて事前混合処理土を埋め立てるものである。対象土量が約 1,700m³と小規模であることから、自走式土質改良機(リテラ:図 - 4)を用いて施工した。

4.2 原料土の土質特性と基本配合

図 - 16 に、掘削土、購入土の粒度分布を示す。従来の本工法では砂分が 80%以上の原料土を対象としていたが、本工事では、砂分が 30%程度で礫分が 50%、細粒分が 20%の細粒分混じり砂礫を原料土として使用した。

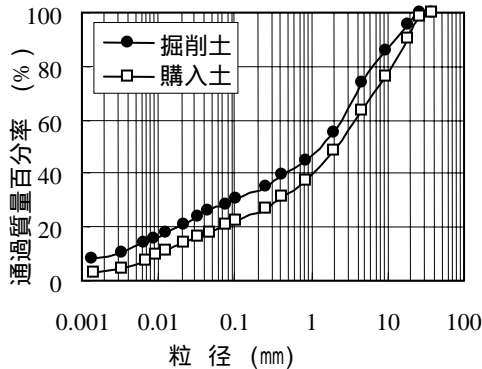


図 - 16 原料土の粒径架加積曲線

本工事の設計基準強度は $q_{udd}=160\text{kN/m}^2$ であり、事前配合試験はこの強度を満足する安定材添加率を求めするために実施した。配合試験での目標強度 q_{udi} は、 q_{udd} に割増係数を乗じたものである。本工事では、使用土砂が細粒分混じり砂礫で、土性のバラツキが大きいことから、改良地盤の均一性が劣ることが予想される施工条件と想定して $\gamma=2.2$ と設定し、 $q_{udi}=352\text{kN/m}^2$ とした。

配合試験結果を図 - 17 ~ 19 に示す。本工事では試験

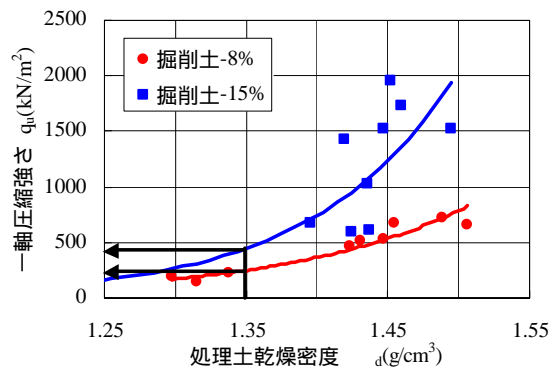


図 - 17 配合試験結果 ($d_d \sim q_u$ 関係)

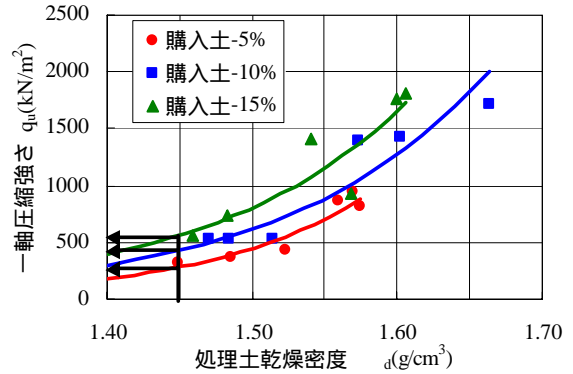


図 - 18 配合試験結果 ($d_d \sim q_u$ 関係) (購入土)

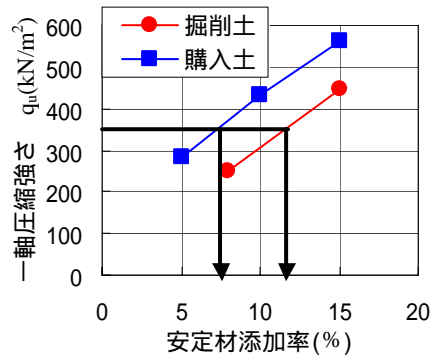


図 - 19 安定材添加率の設定

工事を実施しないため、処理土の埋立後地盤を緩詰め状態と想定し、掘削土では乾燥密度 $d_d=1.35\text{g/cm}^3$ とし、購入土では $d_d=1.45\text{g/cm}^3$ とし安定材添加率を算出した。その結果、掘削土で安定材添加率は 12% (約 160kg/m^3)、購入土で 7.5% (約 110kg/m^3) となった。なお、使用した安定材は高炉セメント B 種であり分離防止剤はポリアクリルアミドである。分離防止剤の添加率は、過去の実績より 90mg/kg (乾燥土重量比) と設定した。

4.3 施工方法及品質管理

自走式土質改良機の土量管理は捲き出し

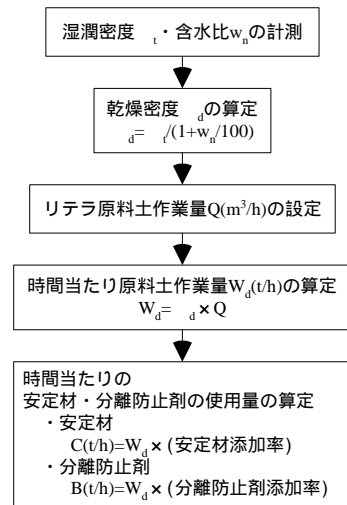


図 - 20 施工配合の算定フロー

ロータによる一定量供給の容積管理であるため、重量割合で設定される上記の配合を容積割合に再設定するためには、原料土の乾燥密度が必要となる。そこで、現地で 1.5m³の容器に原料土を投入しその容積と重量を測定することで湿潤密度を計測し、電子レンジ法(JGS 0122)で含水比を測定して乾燥密度を算定した。そして、施工配合は図-20に示すフローに示すように、乾燥密度からリテラの時間当たりの作業土量を設定し、安定材および分離防止剤の時間当たりの使用量を設定した。

原料土は、最大粒径 40mm、礫分 52%、砂分 28%、細粒分 20%の粒度組成であるが、土性のバラツキが大きいと想定された。よって、施工期間を通して 2 回/日の頻度で原料土の品質管理を行った。その結果を表-3、図-21に示す。含水比は施工期間を通して数%の変動に収まっており、配合に大きな影響はないが、原料土の密度は変動が大きいいため、配合に大きく影響することがわかった。

表-3 原料土の品質管理および施工配合

施工日時	湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	含水比 w(%)	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	施工配合		
				安定材 (kg/m ³)	分離防止剤 (L/min)	
1日目	AM	1.425	20.0	1.188	89	6680
	PM	1.425	20.1	1.187	89	6674
2日目	AM	1.318	18.7	1.110	83	6246
	PM	1.318	18.6	1.112	83	6254
3日目	AM	1.326	19.3	1.111	83	6252
	PM	1.427	22.6	1.164	87	6547
4日目	AM	1.439	22.4	1.176	88	6613
	PM	1.463	21.8	1.201	90	6756
5日目	AM	1.426	22.1	1.168	88	6569
	PM	1.443	21.8	1.185	89	6664
6日目	AM	1.435	21.4	1.182	89	6649
	PM	1.451	22.0	1.189	89	6690

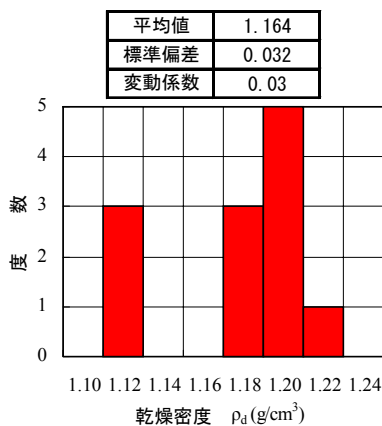


図-21 原料土の乾燥密度

施工期間中に、自走式土質改良機で混合された処理土の安定材含有率と処理土の一軸圧縮強さを調査した。安定材含有率は 2 検体/日の頻度で、処理土のカルシウム分析を

実施し、処理土中の CaO 含有量を計算した。なお、カルシウム分析試験に使用する試料は数 g と少量であることから、4.75mm 以下の粒径の試料を分析試料とした。一軸圧縮強さは 1 供試体/日の頻度で、処理土をモールドに詰めて供試体を作製し、28 日の養生後に試験を実施した。

(1) 安定材含有率

処理土の安定材含有率の試験結果を図-22に示す。安定材含有率は、平均値 9.7±2.5%に分布しており、設計配合の 7.5%と比較して若干大きくなった。これは、分析試験を礫分を除いた試料で行っているために相対的に含有率が大きくなったものと考えられる。また、原料土が礫分および細粒分を多く含有していることから、バラツキの程度は変動係数で 0.24 とベルトコンベヤ方式における過去の実績の最大値 0.201と比較して大きい値となった。

(2) 一軸圧縮強さ

処理土の一軸圧縮試験結果を図-23に示す。室内配合

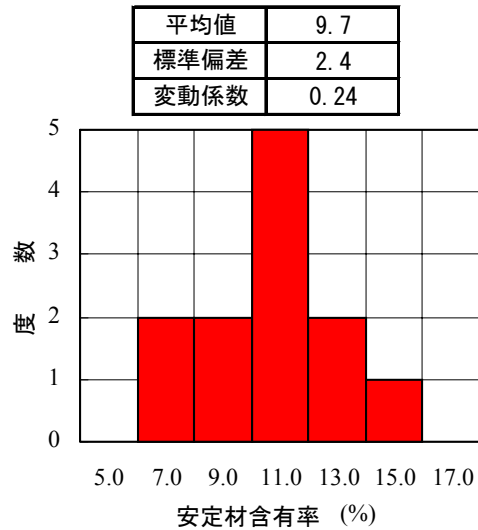


図-22 処理土の安定材含有率

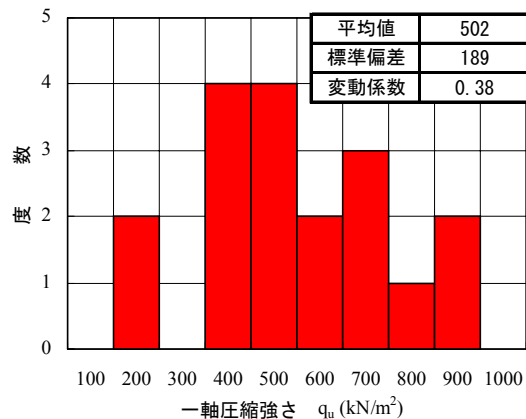


図-23 処理土の一軸圧縮強さ

表-4 事後調査結果

採取位置	B-4			B-11			B-18			全平均	
結果	No.	ρ_t (g/cm ³)	q_u (kN/m ²)	No.	ρ_t (g/cm ³)	q_u (kN/m ²)	No.	ρ_t (g/cm ³)	q_u (kN/m ²)	ρ_t (g/cm ³)	q_u (kN/m ²)
	1	1.978	1846	1	1.892	1441	1	1.913	2466	1.900	1213
	2	1.932	822	2	1.871	1360	2	1.827	842		
	3	1.852	774	3	1.959	773	3	1.878	594		
	平均	1.921	1147	平均	1.907	1192	平均	1.873	1301		

試験での安定材含有率7.5%の一軸圧縮強さ352kN/m²に対し、平均して502kN/m²とやや大きい改良強度が確認できた。しかし、変動係数で0.38のバラツキがあり、強度のバラツキは原料土の粒度組成、密度、および安定材含有率などの変動によるものと考えられる。

4.4 事後調査結果

処理土打設後、28日間養生の後ボーリングにより不攪乱試料を採取し、処理土の一軸圧縮強さを調査した。その結果を表-4に示す。事後調査結果より、平均改良強度は $q_{udf-ave}=1,213\text{kN/m}^2$ となり、十分な改良効果が確認できた。

しかし、設計基準強度 $q_{udd}=160\text{kN/m}^2$ と比較すると、かなり大きな強度となっている。これは、配合試験時に割増係数を

$\alpha=2.2$ と設定し、さらに密度の設定において、緩詰め($\rho_d=1.35\sim 1.45\text{g/cm}^3$ 、 $\rho_t=1.80\sim 1.85\text{g/cm}^3$)と設定したが、実際の施工では狭い施工範囲にタイヤショベルで撒出して埋立をしたため、十分な転圧が行われて湿潤密度が表-3に示したように、平均して $\rho_{t-ave}=1.90\text{g/cm}^3$ ($\rho_d=1.50\sim 1.60\text{g/cm}^3$)と密詰め状態になったことが原因であると考えられる。

5. まとめ

以上の結果をまとめ、粗粒(礫)分を多く含む土砂に対する施工上の留意点、および狭小地施工における留意点を以下に述べる。

5.1 粗粒(礫)分を多く含む土砂を用いる場合の留意点

礫分を多く含む土砂に対して本工法を適用する場合、

- ①粗粒分の比率が高くなるほど、処理土の乾燥密度が変動しやすいことと、安定材(セメント)による固化効果が均一には発現しにくいことにより、処理土強度のばらつきは大きくなる。したがって、配合設計においては試験検体数を増やすなどして、処理土の密度と強度のばらつきを把握する必要がある。
- ②配合試験や施工中の品質管理に用いるモールドは、通常使用される $\phi 10\text{cm}\times H20\text{cm}$ のサイズのものでは礫分の最大粒径が大きいと均質な供試体を作製することが困難であるため、最大粒径に応じて大きなサイズのものを使用することが望ましい。
- ③処理土の乾燥密度は強度に指数関数的に大きく影響する⁴⁾。したがって品質管理として原料土の密度をこまめに把握して安定材添加量にフィードバックするなどの、綿密な品質管理を行う必要がある。

5.2 狭小地施工における留意点

狭小地施工における留意点を以下に述べる。

- ①施工場所が狭い場合、大型の施工機械を使用することが困難であるため、自走式土質改良機(リテラ)のような汎用の小型機械による施工が必須となる。今回、リテラは機械的な混合性能は従来の機械練りミキサやベルトコンベア



写真-1 処理土（埋立前）



写真-2 処理土の打設状況

方式と比較して同等の性能を有することが確認できた。

- ②リテラは土量管理が掻き出しロータによる容積管理であるために、重量配合で設定されている事前混合処理工法を施工する場合には原料土の密度を把握する必要がある。今回は 1.5m³ の容器を用いて密度を測定したが、この方法は現場の施工管理に有効であったと考えられる。
- ③狭小で閉塞した縦長な断面を本工法で施工する場合、タイヤショベルなどの陸搬機械で撒き出すと、転圧による締め固め効果が期待できる。よって乾燥密度が大きくなるので、安定材(固化材)の添加量を減らすことができ、より経済的な施工を行うことが可能である。

5.3 まとめ

近年、良質な砂質土はなかなか入手しにくくなっており、条件の悪い土砂を施工に用いたいという事例がますます増えていくものと予想される。今後は、施工事例を増やしてデータの収集・分析を行い、密度～安定材添加量～発現強度(配合、現場)の考え方を再整理し、土質別の配合試験方法、品質管理手法、設計における割増係数などに反映していく必要がある。

謝 辞

最後に、本文で紹介した2件の工事について、施工全般を通して適切な御指導を頂いた、北海道開発局釧路開発建設部ならびに静岡県沼津土木事務所の方々に謝意を表します。

参考文献

- 1) 事前混合処理工法技術マニュアル、(財)沿岸開発技術研究センター
- 2) 事前混合処理工法 PREM 工法パンフレット、事前混合処理工法協会
- 3) 二宮他：スレーキング性泥岩を材料とした事前混合処理工法の実施結果、第 58 回土木学会講演集、pp.1217～1218,2003
- 4) 今林他：泥岩破碎土を用いた事前混合処理工法の室内配合試験、第 59 回土木学会講演集、pp.989～990