

低密度軽量混合処理土の 実機施工試験

小泉 博之¹・川辺 克明²・御手洗 義夫³・川合 弘之³

¹東亜建設工業株式会社 横浜支店（〒231-8983 横浜市中区日本大通18）

²東亜建設工業株式会社 機電部（〒102-8451 東京都千代田区四番町5）

³正会員 東亜建設工業株式会社 技術研究所（〒230-0035 横浜市鶴見区安善町1-3）

港湾や海上空港などの建設事業では大量の土砂を使用することが特徴である。しかし従来のように山砂を大量に供給することは困難になってきている。また、沿岸域の都市においては、浚渫土や建設発生土などの処分が問題となっている。そのような背景から浚渫土や建設残土を原料土とし、固化材と軽量材（気泡、発泡ビーズ等）を添加混合し、密度・強度を任意に設定できる軽量混合処理土が用いられている。現在、軽量混合処理土の施工実績は密度 $0.9\sim 1.2\text{g/cm}^3$ であるが、地下水位以高の高盛土部で、より低い密度が求められている。そこで現場施工機器を用いて低密度軽量混合処理土の性質を確認するための実証試験を行った。その結果、低密度軽量混合処理土を実際に作製でき、その性質を確認できた。

キーワード：低密度軽量混合処理土, 圧送距離, 密度変化, 打設勾配, 気泡

1. はじめに

港湾や海上空港などの建設事業では大量の土砂を使用することが特徴である。しかし従来のように山砂を大量に供給することは困難になってきている。また、沿岸域の都市においては、浚渫土や建設発生土などの処分が問題となっている。そのような背景から浚渫土や建設残土を原料土とし、固化材と軽量材（気泡、発泡ビーズ等）を添加混合することで、密度・強度を任意に設定できる軽量混合処理土が用いられている。

現在、軽量混合処理土の施工実績は密度 $0.9\sim 1.2\text{g/cm}^3$ であるが、地下水位以高の高盛土部で、より低い密度が求められている。軽量混合処理土の密度を軽くするには、添加する気泡の量を増加する必要がある。しかし、軽量混合処理土の材料の中で、圧送距離等の要因に対して最も状態が不安定な物が気泡であると考えられるため、気泡添加量を増加すると、軽量混合処理土の状態変化が大きくなると考えられる。

また、密度 0.9g/cm^3 以下の軽量混合処理土は試験室レベルで少量作製されており、気泡量が増加すると通常密度 (1.1g/cm^3) では 20cm 程度だったフロー値が 12cm 程度と小さくなることを確認している。軽量混合処理土のフロー値と流動性は密接な関係があるとされており¹⁾、フロー値が通常より小さいことから流動性が低下し打設勾配が急勾配になることが予想された。そこで現場施工機器を用いて作製した軽量混合処理土の性質を確認するため以下の実証施工試験を行った。

①軽量混合処理土のポンプ圧送距離と密度・強度の関係（長距離圧送試験）

②軽量混合処理土の打設勾配の確認

2. 軽量混合処理土工法

(1) 工法の特徴

軽量混合処理土工法は通常 $80\sim 120\text{kg/m}^3$ の固化材と $100\sim 500\text{L/m}^3$ の気泡を混合して、密度 $0.8\sim 1.3\text{g/cm}^3$ ・強度 $200\sim 1500\text{kN/m}^2$ の特性を持った軽量混合処理土を製作する工法である。以下に工法の特徴を示す。

a) 圧密沈下の低減

軽量処理土は自然地盤材料とは異なり、適切な密度や強度に調整できる均質な地盤材料であることから、地盤の圧密沈下量の低減などに有効である。

b) 水中分離

水中不分離性を有する配合設計が可能であり、周辺海域環境への影響を低いレベルに抑えて施工できる。

c) 流動性

適度な流動性を有しており、ポンプ圧送のみで締め固めることなく自由な形状に打設可能である。

d) リサイクル

高含水比の浚渫土や建設発生土を原料として有効に活用できる。

(2) 工法の用途

軽量混合処理土工法の主な用途を図-1¹⁾に示す。

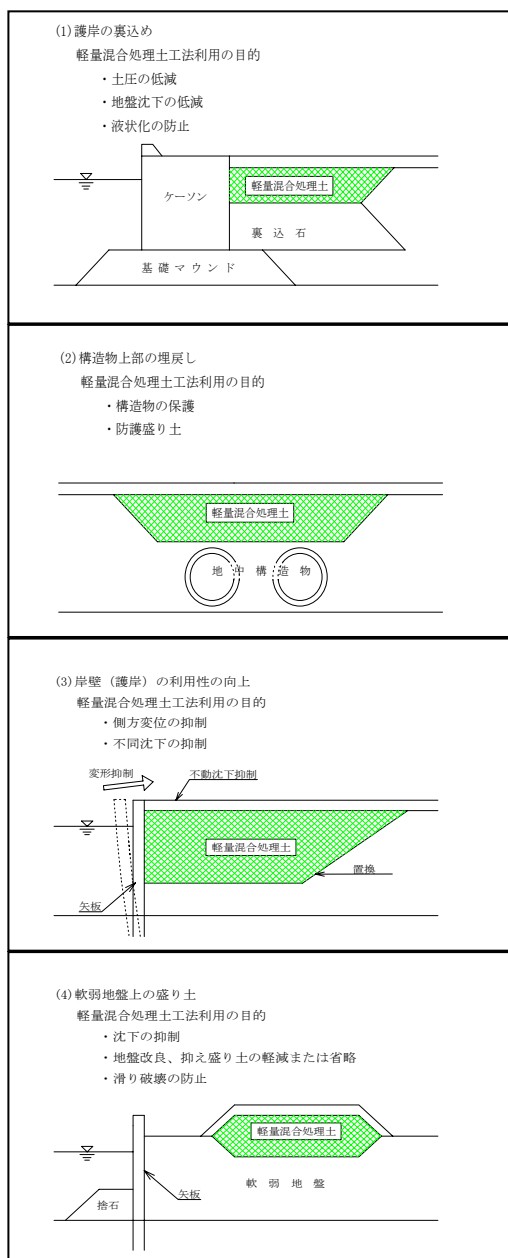


図-1 軽量混合処理土工法の用途¹⁾

(3) 施工方法

図-2 のように軽量混合処理土工法の施工は、(a) 解泥工、(b) 調泥工、(c) 混練工、(d) 打設工の工程によって構成されている。原料土採取場所から運搬した原料土の粒径の大きい礫等の雑物を解泥船上で除去した後、加水・攪拌し、スラリー化して調泥槽へ圧送する。調泥槽で再度加水を行い、密度調整を行った調整土を混練りプラントへ定量供給し、連続ミキサー内で固化材・気泡を定量添加して混合して、スクイズ式ポンプで圧送する。圧送した軽量混合処理土を専用の打設装置（トレミー管）を使用して打設現場へ打設する。

3. 軽量混合処理土の密度変化

現在までの実績で蛋白系起泡剤を使用した軽量混合処理土は、圧送前後に $0.05 \sim 0.15 (\text{g}/\text{cm}^3)$ 程度の密度変化（密度増加）を起こすことがわかっている。（界面活性剤系起泡剤を使用した施工実績では $0.02 \text{g}/\text{cm}^3$ 程度²⁾）。その他にも、以下のような種類の密度変化がわかっている。

- 1) 原料土中の油分や有機物などによる密度変化
- 2) 混練中の密度変化
- 3) ポンプ圧送中の密度変化
- 4) 打設後の流動による密度変化
- 5) 硬化前の水圧による密度変化
- 6) 打設厚（土被り圧）による密度変化
- 7) 初期硬化時の体積収縮による密度変化
- 8) 乾燥収縮による密度変化

この内、1)～6)までが硬化前の軽量混合処理土の密度変化であり、日々の品質管理はこの段階での密度変化量を把握する作業である。また、この段階での密度変化値を抑えることで、より安定した品質の軽量混合処理土の作製が可能となる。

また、上記の密度変化のうち3)、4)以外については室内試験での確認が可能である。よって、室内では確認が難しく密度変化が大きいと考えられる3)圧送中の密度変化について施工実機を用いて試験した。

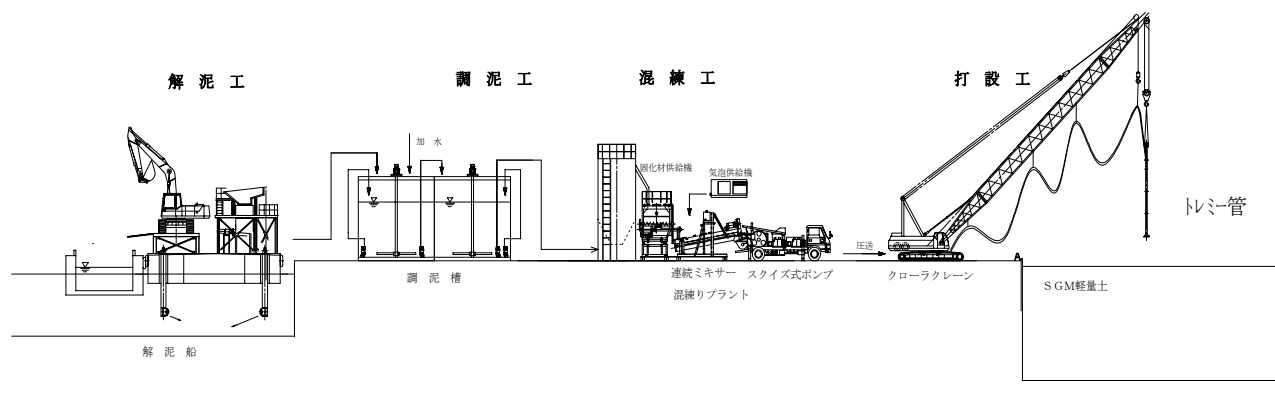


図-2 施工方法概要

4. 実証試験

(1) 事前室内試験

実証試験は長距離圧送試験と打設勾配確認試験の2試験を行った。この2試験を行う前に原料土の土質試験、室内配合試験を行い、試験室レベルでの目標密度 $0.8\text{g}/\text{cm}^3$ を満足する気泡割増量を確認した（今回の試験打設は固化材添加量を $120\text{kg}/\text{m}^3$ に固定して行った）。ここで、気泡割増量とは、軽量混合処理土を作製時に気泡が消える（消泡）現象があり、この消泡量を見込んで割増し添加する気泡の量である。この気泡の消泡量は原料土の土質によって異なる値を示す。

上記室内配合試験で決定した配合を基にして、実機による軽量混合処理土の作製を行い、長距離圧送試験や、打設勾配確認試験を実施した。図-3に試験フロー図、表-1に実証試験条件を、表-3に軽量混合処理土基本配合表を示す。なお、今回の試験は原料土の土質、起泡剤、希釈水の水質、水温などをほぼ一定の条件として軽量混合処理土を作製した。

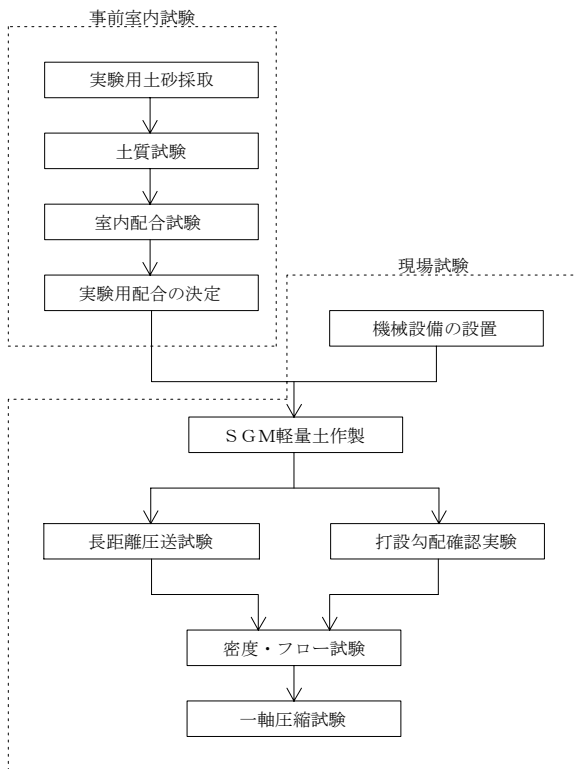


図-3 試験フロー図

(2) 長距離圧送試験

a) 試験方法

長距離圧送試験では、実験ヤード内に設置したピットに軽量混合処理土打設用のトレミー管を使用して打設を行い、軽量混合処理土の圧送前後及び、1日養生後に生じる密度変化を確認した。圧送後の試料採取は各圧送距離に応じた圧送時間を考慮し、圧送時間が経過してから圧送後の試料採取を行った。

軽量混合処理土の目標密度は $0.8\text{g}/\text{cm}^3$ で固定し、圧送距離を200m, 300m, 400m, 500mに変化させ、圧送距離が密度変化に及ぼす影響を確認した。また、圧送距離を200mで固定し、目標密度を0.7, 0.8, $0.9\text{g}/\text{cm}^3$ に変化させて、目標密度の違いによる密度変化も確認した。また、圧送後の軽量混合処理土をモールドに採取して、1日間恒温（ 20°C ）で養生した後密度を確認した。

圧送試験で軽量混合処理土の圧送に使用したスクイズ式ポンプ車の仕様を表-2に、圧送試験の概要図を図-4に示す。

表-1 実証試験条件

土質特性				
一般	湿潤密度	ρ_t	g/cm^3	1.409
	乾燥密度	ρ_d	g/cm^3	0.661
	土粒子の密度	ρ_s	g/cm^3	2.648
	自然含水比	Wn	%	113.2
粒度	礫分	(2~75mm)	%	0
	砂分	(75 μ m~2mm)	%	17.3
	シルト分	(5~75 μ m)	%	37.4
	粘土分	(5 μ m未満)	%	45.3
コンシステンシー 特 性	液性限界	WL	%	85.2
	塑性限界	WP	%	36.9
	塑性指数	IP	%	48.3
pH試験				5.5
強熱減量試験			%	9.63
有機物含有量			%	5.13
使用機器				
名 称		仕 様	数量	備 考
土運船		500m ³ 積	1	原料土解泥用
解泥船			1	
一次調泥槽		30m ³ 水槽	4	
二次調泥槽		50m ³ 水槽	2	
混練りプラント		45m ³ /h	1	
圧送ポンプ		表-2に示す		
使用材料				
名 称		仕 様	備 考	
固化材(セメント)		高炉B	添加量 120kg/m ³	
起泡剤		タンパク系	モノクリートFM	

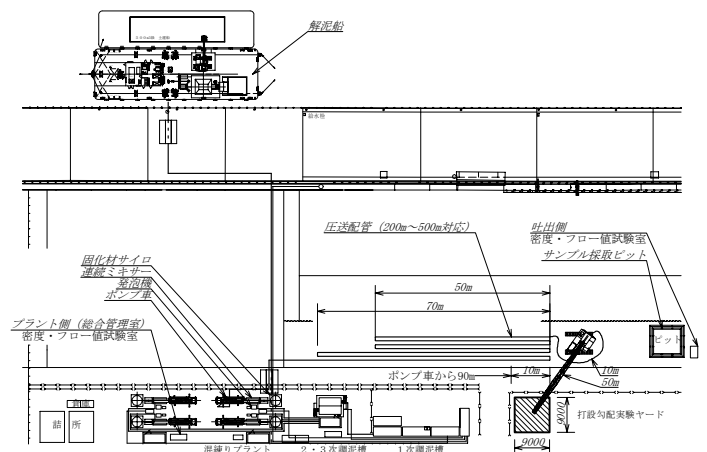
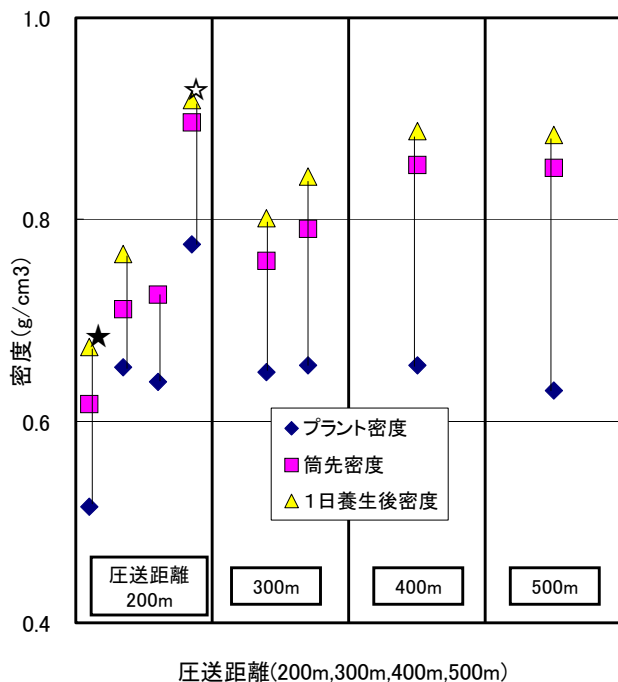


図-4 圧送試験概要図

表-2 圧送ポンプ仕様

型 式	スクイズポンプ車
架装シャシ	8t車級
最大吐出量	80m ³ /h(高速) 50m ³ /h(低速)
圧送管径	100mm



※注：★のケースは目標密度 0.7 (g/cm³) で、
☆のケースは 0.9 (g/cm³)，その他は目標密度 0.8 (g/cm³) で軽量混合処理土を作製。

※注：筒先密度は、打設ピットに打設した（圧送後の）軽量混合処理土の密度。

図-5 圧送距離と密度変化の関係

b) 試験結果

図-5に示すように、プラントで混練りした軽量混合処理土は、打設にともない密度が増加する結果となった。今回、密度の増加を圧送中（プラント～筒先）と、養生中（筒先～1日養生後）にわけ計測した。

① 圧送中の密度変化

・密度の影響

密度（気泡量）が密度変化に及ぼす影響を調べるため3密度(0.7, 0.8, 0.9g/cm³)と気泡量を変え、圧送距離を200mに固定し試験を行った。図-6に示すように密度変化は0.06～0.12g/cm³程度となった。蛋白系起泡剤を使用した施工実績（目標密度1.1g/cm³, 圧送距離100～200m程度）でも圧送中の密度変化は0.05～0.15(g/cm³)程度生じており、それと同等の結果となった。

・圧送距離の影響

上記のように圧送距離が200m程度の場合は既往の実績(目標密度1.1g/cm³)の密度変化と同等の結果となった。同じ配合(目標密度0.8g/cm³)で圧送距離が300m以上の場合は、圧送距離の増加に伴ない密度変化も増加している。これは軽量混合処理土圧送中に摩擦や圧力変動を受けること等が消泡に影響していると予測される³⁾。

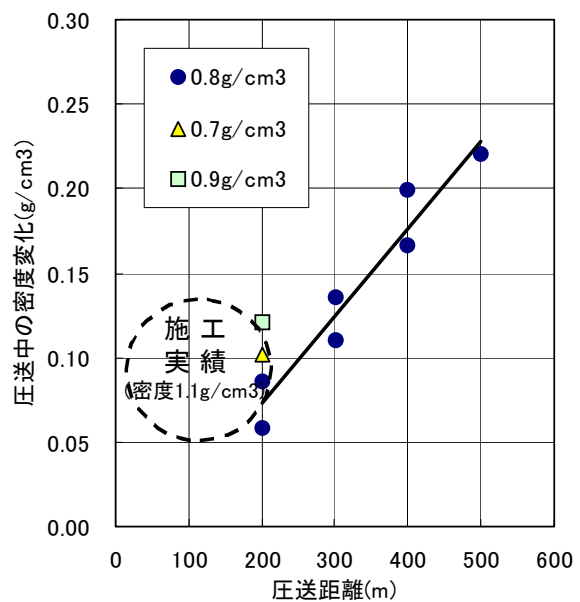


図-6 圧送中の密度変化

表-3 軽量混合処理土標準配合表

使用材料		条 件	
原料土	建設残土(5mm以下)	調整土含水比 w (%)	413.7
固化材	高炉セメントB種	固化材添加量 C (kg/m ³)	120
使用水	現地採取水	起泡剤希釈倍率 n (倍)	20 (体積比)
軽量材料	気泡(起泡剤) モノクリートFM	希釈液発泡倍率 m (倍)	20 (体積比)

1m ³ 当たりの標準配合表													
目標密度 ρ (g/cm ³)	固化材 添加量 C (kg/m ³)	質 量 (kg)						体 積 (リットル)					
		含水比調整土		固化材 mc	軽量材		全体 m	含水比調整土		固化材 vc	軽量材		全体 v
		乾燥土 ms	調整水 mw1		起泡剤 mA	希釈水 mw2		乾燥土 vs	調整水 vw1		起泡剤 vA	希釈水 vw2	空気 va
0.9	120	148.8	615.7	120	0.890	14.613	900	55.4	604	39.3	0.754	14.326	287
0.8	120	128.5	531.4	120	1.156	18.983	800	47.9	521	39.3	0.980	18.611	372
0.7	120	108.1	447.1	120	1.422	23.354	700	40.3	438	39.3	1.205	22.896	458

② 1日養生中の密度変化

これまでの施工実績では圧送後試料の養生中には密度変化は $0\sim 0.02\text{g/cm}^3$ 程度であった．今回，圧送後1日養生中にモールド内での密度増加（沈下）が $0.03\sim 0.06\text{g/cm}^3$ 程度生じた（それ以後は養生中の密度に変化は無かった）．図-7に示すように，養生中の密度変化は筒先での密度が軽く空気量が多いほど大きい．

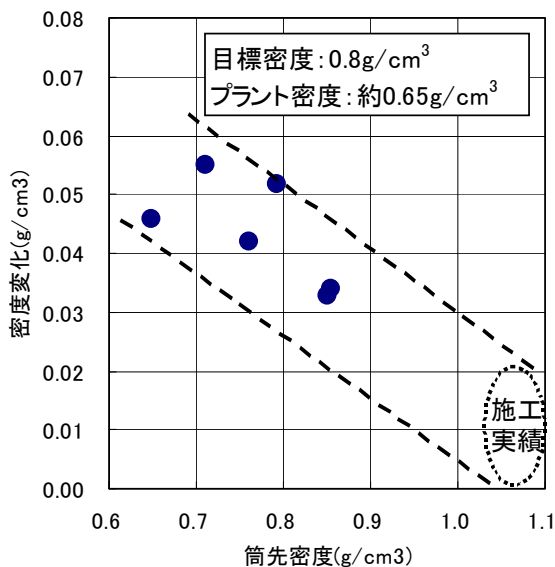


図-7 養生中の密度変化

③ 密度変化と強度の確認

圧送が密度変化に影響を及ぼすことは前述した．圧送後の密度変化した軽量混合処理土（目標密度 0.8g/cm^3 ）を28日間養生後に一軸圧縮試験を行った結果を図-8に示す．密度変化した試料は密度の増加により一軸圧縮強度の増加が認められた．軽量混合処理土中の気泡量が変化したことにより，気泡の割合が多いケースほど強度は低くなっている⁴⁾．

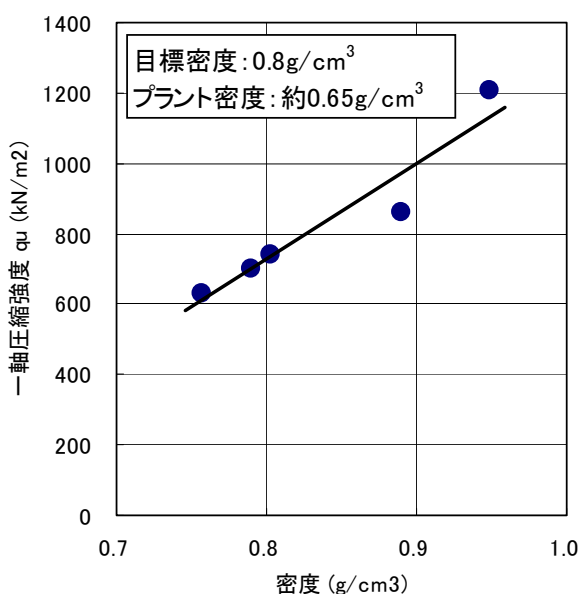


図-8 密度と一軸圧縮試験

(3) 打設勾配確認試験

a) 試験方法

打設勾配確認試験（以下，勾配試験）では，軽量混合処理土をピット内で調整した後，平坦な場所に打設した．軽量混合処理土の目標密度は 0.8g/cm^3 とした．

打設管はクローラークレーンで吊り，地面より5cmほど離して設置した．また，打設場所には計測しやすいように1.5mピッチで測量杭を設置し，9m×9mの範囲内に打設を行った．

打設時の軽量混合処理土はプラント採取時の密度 0.65g/cm^3 ，筒先採取時の密度 0.71g/cm^3 であった．圧送距離は200mとした．

図-9に打設概要図を示す．

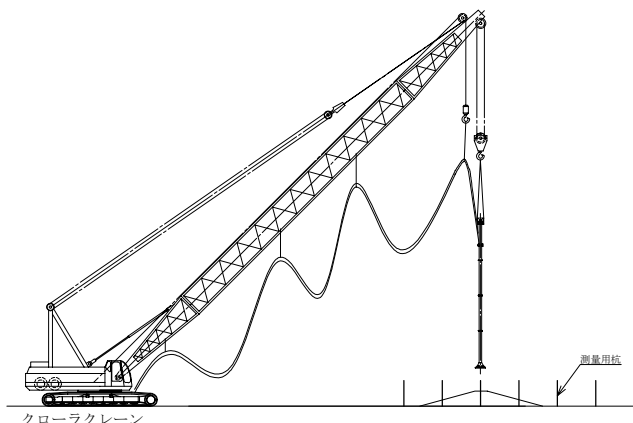
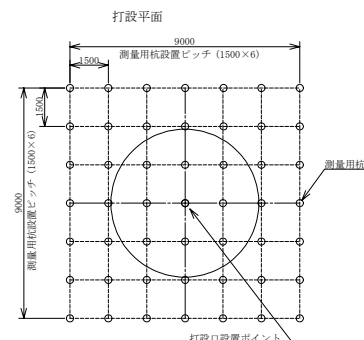


図-9 打設概要図

b) 試験結果

配合試験でのフロー値が既往の実績と比較して8cm程度小さかった．よってフロー値と密接な関係にある打設勾配¹⁾も小さくなると予想していた．しかし，図-10の実験結果に示すように，平均勾配で1:32～1:56と予想より緩かった．通常密度の軽量混合処理土の打設勾配も流速や打設状態により1:20～1:70程度となるため，それと同等の結果となった．また，配合試験でのフロー値（調整土フロー値45cm時）とプラント，筒先でのフロー値（調整土フロー値49cm時）を表-4に示す．

表-4 フロー値 (cm)

	配合試験	プラント	筒先
既往の実績 (密度1.1g/cm ³)	22程度	15程度	20程度
今回試験 (目標密度0.8g/cm ³)	14	12	17

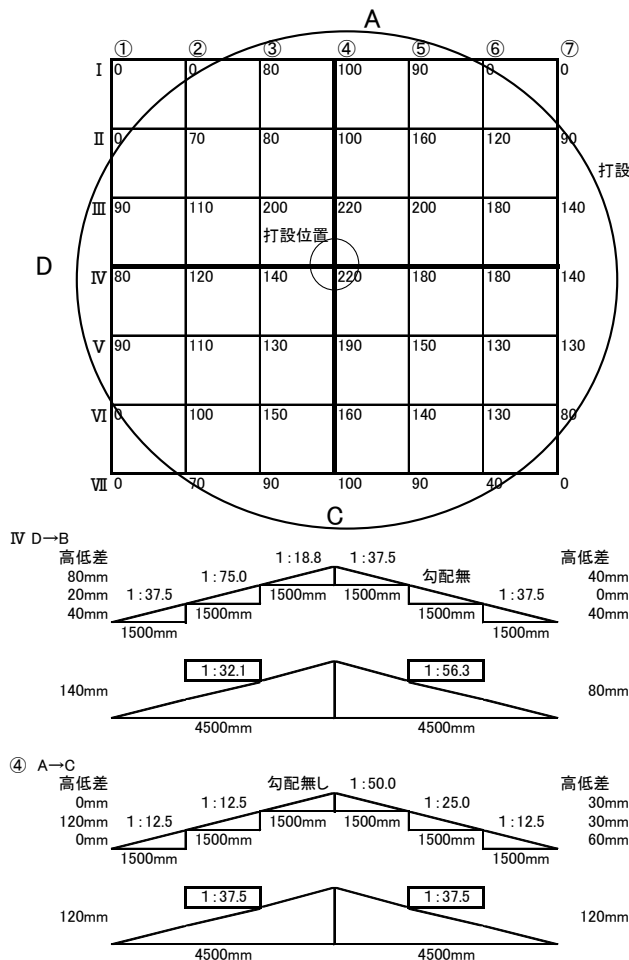


図-10 打設勾配試験結果

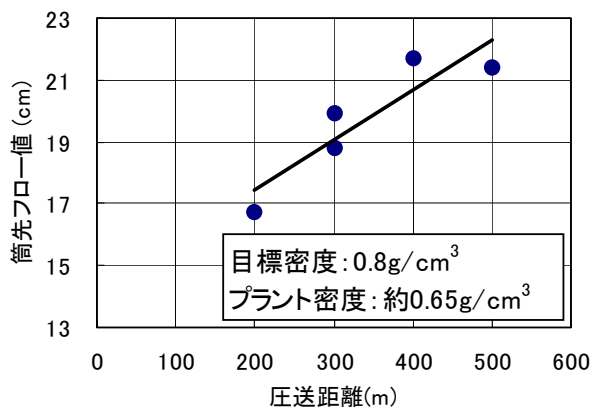


図-11 圧送距離と筒先フロー値

勾配試験の際、プラントでのフロー値は12cm程度であったが、筒先の試料は17cm程度に広がっていた。フロー値17cmは既往の実績（目標密度1.1g/cm³）のフロー値と同等である。よって打設勾配も通常の密度の軽量混合処理土と変わらない結果になったと考えられる。

勾配試験以外も含め筒先フロー値を図-11に示す。圧送距離の増加に伴ないフロー値も増加しており、それにより打設勾配も緩くなると考えられる。

5. まとめ

1. 圧送距離が200m以下であれば低密度（0.8g/cm³程度）でも既往の実績（目標密度1.1g/cm³）と密度変化は同等の0.06～0.12g/cm³程度であった。
2. 圧送距離が300m以上の場合、圧送距離の増加に伴ない圧送中の密度変化も大きくなる。
3. 圧送後の軽量混合処理土の空気量が多くなると養生中の密度変化が大きくなり、今回の試験の密度0.8g/cm³では通常密度1.1g/cm³の3倍程度養生中に密度変化した。
4. 圧送により密度変化した軽量混合処理土は変化後の気泡量が多いほど強度は弱くなる。
5. 低密度軽量混合処理土のプラントでのフロー値は小さい。しかし、圧送によりフロー値は増加する傾向がある。今回200mの圧送で筒先でのフロー値は既往の実績（目標密度1.1g/cm³）に近くなった。また打設勾配も1:32～1:56と既往の実績と同等になった。

密度変化にはプラントにおける気泡量の割増、強度は固化材量で対応可能である。しかし、原料土の土質や圧送距離などの施工条件によりその数量は変わるため、設計強度、密度を満足するためには通常と同じく配合試験、試験打設を行い強度発現、密度変化を把握することが必要である。

参考文献

- 1) (財) 沿岸開発技術研究センター：港湾・空港における軽量混合処理土工法技術マニュアル，1999.4.
- 2) 盛野正晴，奥平幸男，中沢一博，佐藤孝夫，山根信幸，御手洗義夫：気泡混合処理土の大水深(10m)への打設，第36回地盤工学研究発表会，pp.855-856，2001.6.
- 3) 川合弘之，御手洗義夫，川辺克明，遠藤千秋：気泡混合処理土の打設時の圧送圧力が密度変化に与える影響について，第36回地盤工学研究発表会，pp.853-854，2001.6.
- 4) 御手洗義夫，岸田隆夫，田口博文，土田孝：各種原料土を用いて作製した気泡混合処理土の品質に関する考察，土と基礎，Vol. 48No. 6，pp. 25-27，2000. 6.