

# 大水深における軽量混合処理土の品質管理 - 新しい起泡剤の採用と品質管理手法の確立 -

大久保泰宏\* 安井 章\*  
中内 正司\*\* 鴨居 政和\*\*  
末成 寛志\*\* 真鍋 匠\*\*\*

## 要 旨

新衣浦海底トンネル建設に伴い、沈埋トンネル取付け部の護岸復旧の埋戻土として軽量混合処理土の打設を行った。この軽量混合処理土の施工は、水深約-11mの大深度における水中打設となるため、厳密な品質管理が必要となる。

大水深における軽量混合処理土の施工では、軽量材として用いる気泡の安定性が、品質管理上の重要なポイントとなるため、施工に先立ち、軽量混合処理土に使用する起泡剤について各種試験を行い、実施工における配合仕様の決定を行った。

このような起泡剤に関する各種試験と軽量混合処理土のプラント監視システムを構築して品質管理を行った結果、大深度における水中打設 新しい起泡剤の採用などの課題を克服し、所定の品質を満足してその施工を終えることができた。

## 1. はじめに

新衣浦海底トンネル建設に伴い、沈埋トンネル取付け部の護岸復旧に際して、沈埋トンネルへの荷重低減を図りつつ所定の強度を確保するため、埋戻土として軽量混合処理土の打設を行った。今回の軽量混合処理土の施工は、水深約-11mの大深度における水中打設である。水深-10mを越えるような大水深に軽量混合処理土を施工した事例<sup>1)</sup>は少なく、より厳密な軽量混合処理土の品質管理が要求された。

軽量混合処理土の品質確保において、軽量材として用いる気泡の安定性は、非常に重要であり、施工に先立ち、軽量混合処理土に使用する起泡剤について発泡性状確認試験、起泡剤評価試験および配合試験を行い、その結果をもとにして、実施工における配合仕様の決定を行った。

本報文では、軽量混合処理土に関する各種試験から得ら

れた気泡の特性や軽量混合処理土の特性について述べる。また、実施工における配合、品質管理手法、処理土の品質についても合わせて報告する。

## 2. 施工箇所の概要

軽量混合処理土の施工は、沈埋トンネル取付け部の護岸復旧の際に沈埋函の上載荷重の低減を目的に、埋戻土の一部として約 16,000m<sup>3</sup>、施工された。施工断面図を図-1に示す。打設箇所は沈埋トンネルの立坑前面の鋼管矢板および基礎捨石マウンドによって囲まれた水中部であった。

軽量混合処理土の打設深度は、K.P.-11.0～-1.5mであり、要求される処理土の単位体積重量は、K.P.-11.0～-8.0mにおいては 13kN/m<sup>3</sup>、K.P.-8.0～-1.5mでは 12kN/m<sup>3</sup>である。軽量混合処理土の設計基準強度は 200kN/m<sup>2</sup>である。

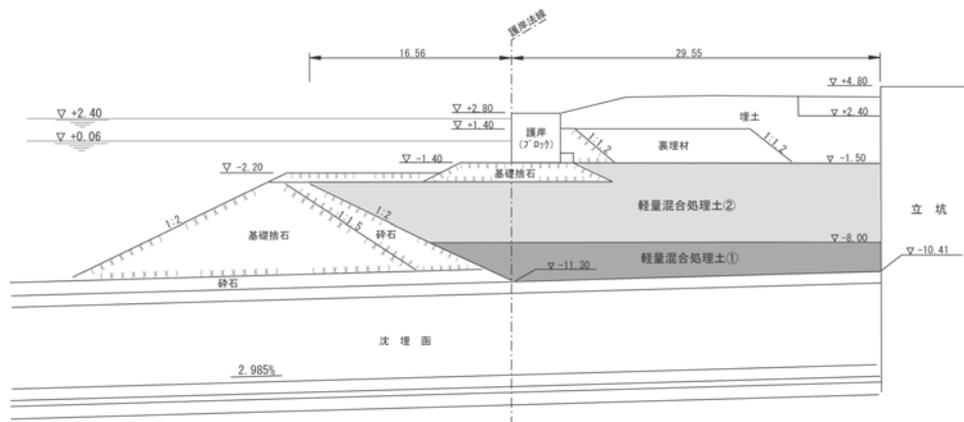


図 - 1 施工断面図

\*技術研究所\*\* 名古屋支店\*\*\* 機械部

### 3. 気泡混合処理土

軽量混合処理土は、気泡混合処理土と発泡ビーズ混合処理土に大別できる。気泡混合処理土はスラリー状の土砂に気泡と固化材を混合した地盤材料であり、発泡ビーズ混合処理土はスラリー状の土砂に発泡スチロール粒と固化材を混合した地盤材料である。いずれも気泡や発泡ビーズの混合量、固化材量を変化させることによって、所定の密度や強度に調整できるという利点がある。

本施工では、現地での発泡が容易である点などから気泡混合処理土を採用した。

### 4. 起泡剤の発泡性状確認試験

今回の施工では、(株)テルナイト社製のテルフォーマーKAを軽量混合処理土の起泡剤としてはじめて採用した。よって、本施工で採用するに際して、起泡剤に関する各種実験を行うとともに、現場条件を想定して、希釈水や温度条件等が及ぼす気泡の発泡性状への影響の確認を行った。

気泡混合処理土に使用する気泡は、起泡剤を希釈した希釈液に圧縮空気を注入して発泡させる事前発泡方式によって作製される。気泡混合処理土に用いられる気泡の性状がばらつく要因として、以下の点が考えられる。

- ) 希釈水の種類および水質
- ) 起泡材(希釈液)の希釈倍率
- ) 発泡倍率
- ) 発泡時の希釈水温度、外気温

)、)については製造メーカーが起泡剤ごとに発泡に最適である条件を設定している。

気泡混合処理土を沿岸部で施工する場合、希釈水は現地の海水を使用する機会が多く、希釈水の水質や水温等の外的環境要因が気泡や気泡混合処理土の品質に影響を与えたと考えられる。

本実験では、気泡の性状に関して ) 希釈水の種類および水質、 ) 発泡時の希釈水温度、外気温の項目について条件を変え試験を行い、施工時の検討を行った。

#### 4.1 実験条件

実験条件は以下の通りとする。表-1に実験ケースの一覧表を示す。

##### a) 起泡剤の種類

起泡剤は界面活性剤系としてテルフォーマーKAを、比較対象として気泡混合処理土の起泡剤として実績のある蛋白系起泡剤Aを使用した。

##### b) 希釈水の種類

希釈水は沿岸部での調達が可能である海水とメーカー推奨の淡水(水道水)を使用した。

##### c) 希釈液の水温

起泡剤を水で薄めた希釈液の水温を10に設定した。尚、希釈倍率はテルフォーマーKA、蛋白系起泡剤A共に20倍希釈とした。いずれもメーカー推奨値である。(希釈倍率は容積比)

##### d) 発泡後の養生気温

発泡機が室外設置であったため発泡時は室外温度(平均9)による発泡となったが、作製した気泡は所定の容器に採取し、室内(平均23)と室外(平均9)に静置して経過時間による気泡の状態を観察した。なお、発泡倍率は20倍と設定した。(発泡倍率は体積/重量)

表-1 実験ケース

case	起泡剤	希釈水	気泡養生
1	蛋白系起泡剤 A	淡水	室内(23) 室外(9)
2		海水	室内(23) 室外(9)
3	テルフォーマーKA	淡水	室内(23) 室外(9)
4		海水	室内(23) 室外(9)



写真-1 発泡装置



写真-2 発泡管



写真 - 3 発泡状況(テルフォーマーKA)

#### 4.2 試験項目

各実験条件により発泡させた気泡に対し、気泡の安定性と強度について検討を行った。

##### a) 気泡の安定性(液化率)

気泡の安定性は採取直後の気泡と消泡によって生じた希釈液の重量比(液化率)により評価する。

試験は所定の容積の容器に気泡を充填し、経時的に容器底部に生じる希釈液の体積を計測し、下式によって液化率を求めた。

$$\text{液化率(\%)} = \frac{(\text{所定時間に発生する希釈液容積} \times \text{希釈液密度 } \rho_{\text{e}})}{\text{採取直後の気泡重量(g)}} \times 100$$

発泡の状態が悪い場合、一度発泡した気泡が空気が抜けて消泡し、液化して希釈液に戻ってしまうため液化率は大きくなる。

##### b) 気泡の強度

気泡の強度は粘性を測定することにより評価した。粘性は粘度計(ビスコメーター)により測定した。

また、shearometer と呼ばれるアルミ筒( 35.5mm × h 88.5mm, 5.04g)を気泡に貫入させ、完全貫入するまでの時間を計測することで気泡の強度を相対的に比較する指標とした。



写真 - 4 shearometer

#### 4.3 試験結果

各実験ケースの密度計測結果と発泡倍率を表-2 に示す。

表-2 気泡密度と発泡倍率

case	起泡剤	起泡材	平均密度 (g/cm <sup>3</sup> )	平均発泡倍率
1	蛋白系起泡剤 A	淡水	0.041	24.2
2		海水	0.046	22.0
3	テルフォーマーKA	淡水	0.053	18.9
4		海水	0.066	15.1

##### 1) 気泡の液化率

実験結果を図 - 2、3 に示す。今回の実験結果によると、希釈水に淡水を使用したほうが海水希釈に比べ液化率が低く、気泡の安定性が良い結果となった。また、液化率が大きくなった海水で希釈を行った蛋白系起泡剤の場合では、気泡採取直後にきめ細やかな気泡であったのが、経過時間が 12 分程度から液化し始め、20 分経過後には気泡が粗くなり、鬆(す)が多い状態が観察された。

養生温度における気泡安定性は室外(平均 9 )に静置していたものより、室内(平均 23 )の高温域に置かれたものの方が、消泡して液化する傾向が高いと言える。

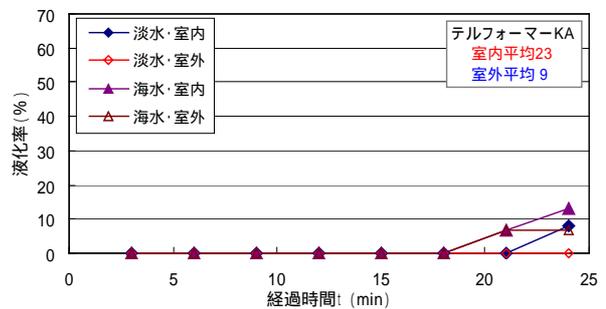


図 - 2 気泡安定性試験結果(テルフォーマーKA)

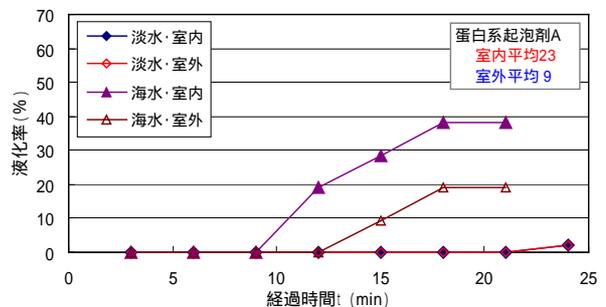


図 - 3 気泡安定性試験結果(蛋白系起泡剤 A)

## 2) 気泡の強度

気泡の強度試験結果を表 - 3 に示す。また、ビスコメーターによる試験結果を図 - 5 に示す。

ビスコメーターの試験結果では、蛋白系起泡剤 A の気泡の場合では、希釈水が淡水、海水に関わらず粘度が 1100 (cp) となった。また、テルフォーマーKA の場合、希釈水として海水を使用したときの強度が淡水使用の強度を大きく下回った。また、shearometer による強度比較の結果は、相対的な比較ではあるが、界面活性剤系のテルフォーマーKA に比べ、蛋白系起泡剤 A のほうが気泡への外的要因に対し抵抗力があった。

表 - 3 気泡の強度試験結果

case	起泡剤	起泡材	ビスコメーター 読み (cP)	shearometer 貫入時間 (sec)
1	蛋白系起泡剤 A	淡水	1100	660以上 上部残19mm
2		海水	1100	660以上 上部残27mm
3	テルフォーマーKA	淡水	1180	638
4		海水	920	390

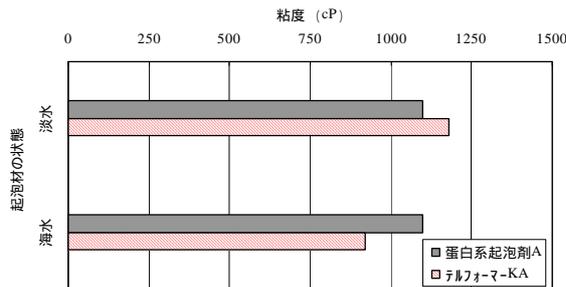


図 - 5 気泡の粘度試験結果(ビスコメーター)

## 5. 起泡剤評価試験

### 5.1 試験要領

起泡剤評価試験では、気泡と泥土と固化材を混合した処理土密度の経時変化を測定し、気泡の安定性に関する検討を行った。試験に使用する原料土は、浚渫粘土を使用した。原料土の物理特性を表 - 4 に示す。

表 - 4 浚渫土の土質試験結果

土粒子密度 $s$ ( $g/cm^3$ )	2.678	
自然含水比 $w_0$ (%)	82	
粒度組成	砂分 (%)	2.7
	シルト分 (%)	35.1
	粘土分 (%)	62.2
液性限界 $w_L$ (%)	100.7	
塑性限界 $w_p$ (%)	41.1	
塑性指数 $I_p$	59.6	
強熱減量 $Li$ (%)	7.3	

起泡剤については、発泡性状確認試験と同様に、界面活性系であるテルフォーマーKA と蛋白系起泡剤Aの2種類について試験を行った。

まず、原料となる粘性土に対して含水比が 255%となるように加水し、含水比調整を行った調整泥土を作製した。その調整泥土に固化材を  $110kg/m^3$ を加えてミキサーで6分間攪拌後、標準配合に基づき気泡を手練りで2分間混合して軽量混合処理土を作製した。試験時の処理土の目標密度は、 $1.10 (g/cm^3)$ とし、試料作製後、密度測定を行った。目標密度に初期調整した処理土を 100mlのメスシリンダー内に移し、最大1時間まで、処理土の体積変化を測定し、処理土密度の経時変化について検討を行った。

### 5.2 試験結果

起泡剤評価試験に用いた処理土は、テルフォーマーKA、蛋白系起泡剤Aともに標準配合にて目標密度である  $1.10 \pm 0.03 (g/cm^3)$ の範囲に収まっており、配合試験時における気泡の割増しの必要がなかった。

処理土密度の経時変化について表 - 5および図 - 6に示す。試験開始時の密度がテルフォーマーKA と蛋白系起泡剤Aでは若干違うが、1時間後の密度変化を比べてもテルフォーマーKA、蛋白系起泡剤Aともにほぼ同程度の消泡による密度増加が見られた。

表 - 5 軽量処理土の密度経時変化

経過時間 (min)	混練直後	3	6	15	30	60
蛋白系起泡剤A	1.117	1.117	1.117	1.125	1.131	1.134
テルフォーマーKA	1.109	1.109	1.115	1.125	1.134	1.137

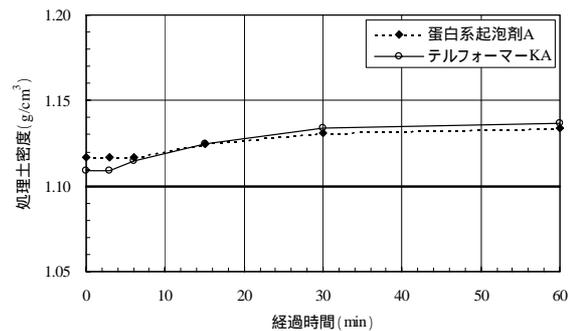


図 - 6 軽量処理土の密度経時変化

## 6. 起泡剤の決定

発泡性状試験および起泡剤評価試験の結果からテルフォーマーKAは、実績のある蛋白系起泡剤Aと同様な品質であることが証明された。よって、施工に使用する起泡剤はテルフォーマーKAとし、気泡の安定性を考慮して希釈水は水道水を使用することとした。

## 7. 気泡混合処理土の現場配合

気泡混合処理土の目標単位体積重量は、固化収縮などによる密度の増分を考慮して、K.P.-11.0 ~ -8.0mの場合  $12\text{kN/m}^3$ 、K.P.-8.0 ~ -1.5mでは  $11\text{kN/m}^3$  に設定した。

気泡混合処理土の基本配合は室内配合試験の結果より表 - 6 に示すようになった。

気泡混合処理土を水中に打設する場合<sup>2)</sup>、打設水深に相当する水压を受けて処理土中に含まれる気泡が縮小するので、要求される処理土の軽量性を確保するためには、現場配合において打設深度に応じ気泡量の割増しをする必要がある。気泡の割増し量の算定は、ボイルの法則に従い、大気圧下で体積  $V_0$  である気泡の水深  $h$  (m) での体積  $V_h$  は、

$$V_h = \{1/(1+h/10)\} \times V_0$$

となり、たとえば、 $h=10\text{m}$  のとき、 $V_h = 1/2 \times V_0$  となる。

また、処理土の圧送における気泡の消泡率は、本施工において約 17% であり、現場においては消泡量に相当する気泡

の割増しを行った。

本施工では、打設深度 50cm 毎に現場配合を変えて打設を行った。本施工における代表的な打設深度での現場配合を表 - 7 に示す。

## 8. 気泡混合処理土の品質管理

気泡混合処理土の施工は、図 - 7 に示すフロー図のように浚渫・運搬、解泥・調泥、混練、圧送・打設の4つの工程で構成される。

「解泥・調泥」は、加水した原料土を 5mm 以下に篩い分ける振動篩、攪拌・加水しながら密度調整を行う解泥槽・貯泥槽、調泥槽、線密度計、および各種水中ポンプで構成される。

「混練」は、気泡発生装置と、調整泥土、固化材、および気泡を混練する連続ミキサ、および調整泥土の流量を計測する電磁流量計で構成される。

表 - 6 気泡混合処理土の基本配合表

	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					単位容積(%/m <sup>3</sup> )				
	起泡材	調整泥土		固化材	合計	起泡材	調整泥土		固化材	合計
		乾燥土	海水				乾燥土	海水		
軽量混合処理土	4.0	303.1	787.9	105.0	1200.0	79.9	113.2	772.5	34.4	1000.0
軽量混合処理土	8.4	272.7	709.0	110.0	1100.0	167.0	101.8	695.1	36.1	1000.0

表 - 7 打設深度毎における気泡混合処理土の現場配合表

	打設深度(m)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					単位容積(%/m <sup>3</sup> )					ミキサ出口 目標密度 (g/cm <sup>3</sup> )
		起泡材	調整泥土		固化材	合計	起泡材	調整泥土		固化材	合計	
			乾燥土	海水				乾燥土	海水			
軽量混合 処理土	-11.0	8.4	303.1	787.9	105.0	1204.4	167.8	113.2	772.5	34.4	1087.9	1.107
	-9.0	7.6	303.1	787.9	105.0	1203.6	151.8	113.2	772.5	34.4	1071.9	1.123
軽量混合 処理土	-7.0	14.2	272.7	709.0	110.0	1105.8	284.0	101.8	695.1	36.1	1116.9	0.990
	-5.0	12.5	272.7	709.0	110.0	1104.2	250.6	101.8	695.1	36.1	1083.5	1.019

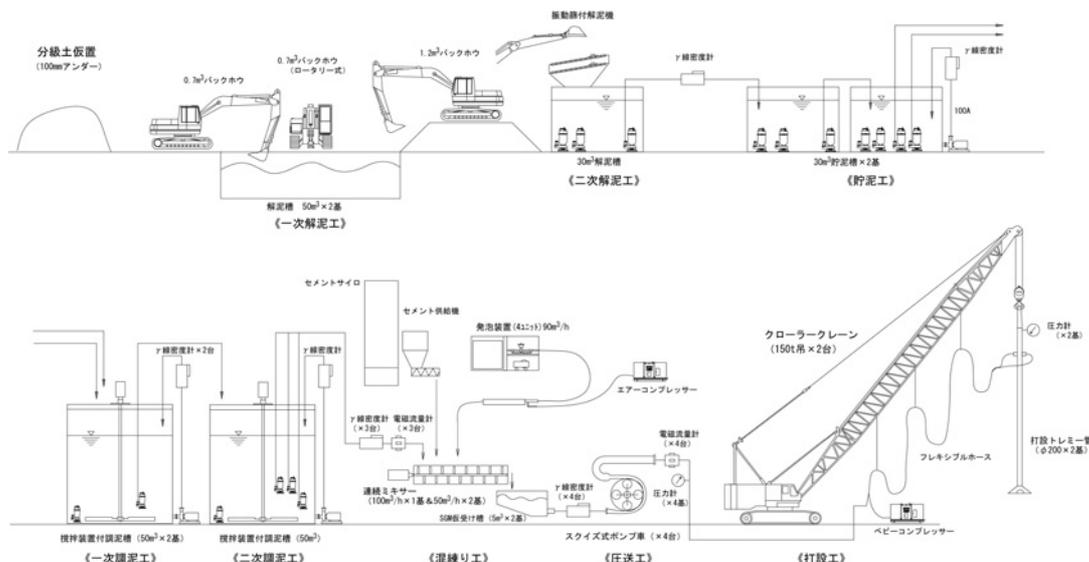


図 - 7 施工フロー図

「圧送・打設」は、連続ミキサで混練した軽量混合土を圧送するスクイズ式ポンプ車と、打設するためのトレミー管、およびそれを吊り上げるクローラクレーンで構成される。

本施工では、独自のプラント監視システムを導入し、各施工段階でのプラント状況が把握できるようになっている。

このプラント監視システムは、プラントに設置した線密度計、電磁流量計、および圧力計等の計測値を、数値およびグラフで表示・収録し、各施工段階におけるプラント設備の集中監視を可能にするとともに、センサを設置できないトレミー管吐出口等における密度の予測など、気泡混合処理土の品質確保のための詳細な施工管理が可能である。

また、現場における気泡混合処理土の品質管理試験として、水中打設前に陸上ポンドにて試験打設した処理土を採取し、処理土の湿潤密度試験、フロー試験、空気量試験を行った。**表-8**に示す品質管理基準を満たしたことを確認した後、水中打設を行うこととした。



図 - 8 プラント監視システム

表 - 8 品質管理基準

試験名	基準値
湿潤密度試験	目標値 ± 0.03(g/cm <sup>3</sup> )
フロー試験	180 ± 20(mm)
空気量試験	規定値 ± 5 (%)

### 9. 気泡混合処理土の品質評価

水中に打設された気泡混合処理土の品質を確認するために、施工完了後に処理土のサンプリングと一軸圧縮試験を行った。処理土の採取深度は、K.P.-3.0 ~ -5.5m K.P.-5.5 ~ -8.0m K.P.-8.0 ~ -9.5m K.P.-9.5 ~ -11.0m の4深度とし、各深度から3本ずつ一軸圧縮試験用の供試体採取を行った。採取した試料は、50 × H100 の供試体に成形し、室内において一軸圧縮試験を行った。

サンプリング試料による処理土の一軸圧縮試験および湿潤密度試験結果を表 - 9 に、また一軸圧縮強さおよび単位体積重量の深度分布を図 - 9 に示す。各深度における処理

土の平均一軸圧縮強さは 342 ~ 536kN/m<sup>2</sup>であり、設計強度である 200kN/m<sup>2</sup>を十分に満たす結果となった。

また、一軸圧縮強さの深度分布をボーリング No.1, 2 とともに、深度が深くなるにつれて強度が大きくなる傾向が見られる。

処理土の単位体積重量は、K.P.-11.0 ~ -8.0m においては 11.46 ~ 11.55kN/m<sup>3</sup>、K.P.-8.0 ~ -1.5m では 10.70 ~ 11.03kN/m<sup>3</sup> となり、要求されていた処理土の単位体積重量 K.P.-11.0 ~ -8.0m で 13kN/m<sup>3</sup> 以下、K.P.-8.0 ~ -1.5m で 12kN/m<sup>3</sup> 以下の条件を満たしており、事前 ~ 施工までの品質管理手法が十分に機能したといえる結果であった。

表 - 9 一軸圧縮試験結果(現地サンプリング)

Bor.No.	採取深度 KP m	平均一軸圧縮強さ (kN/m <sup>2</sup> )	平均単位体積重量 (kN/m <sup>3</sup> )
1	-3.0 ~ -5.5	396	11.35
	-5.5 ~ -8.0	461	10.70
	-8.0 ~ -9.5	536	11.52
	-9.5 ~ -11.0	436	11.55
2	-3.0 ~ -5.5	342	11.03
	-5.5 ~ -8.0	467	10.98
	-8.0 ~ -9.5	469	11.49
	-9.5 ~ -11.0	488	11.46

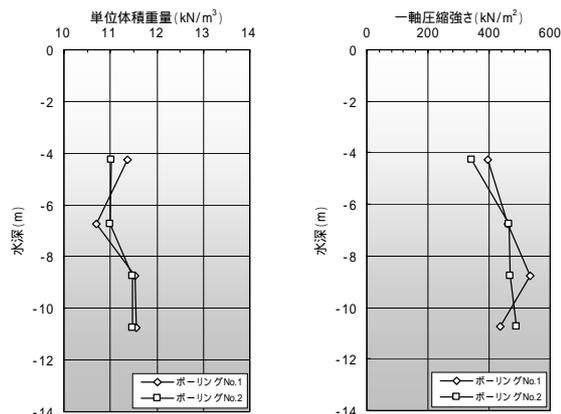


図 - 9 一軸圧縮強さおよび単位体積重量の深度分布

### 10. おわりに

今回の軽量混合処理土の施工は、大深度における水中打設 新しい起泡剤の採用などの課題があったが、起泡剤に関する各種試験を始めとする軽量混合処理土の品質管理の結果、目標とする仕様を満足し、その施工を終えることができた。また、今回の施工を通して、軽量混合処理土の一連の品質管理手法を構築できたと考えている

#### 【参考文献】

- 1) 土田孝他: 水深 10m の海域における軽量混合処理土の打設実験と考察, 港湾空港技術研究所資料 No.1007, 2002
- 2) 軽量混合処理土工法技術マニュアル:(財)沿岸開発技術研究センター, 1999.4, 4-6p.