

軽量混合処理土の大水深への適用

Application of Air Foamed Light-weight Geomaterial Placed in Large Depth

尾 田 俊 雄 (おだ としお)

㈲東京港埠頭公社埠頭建設部 部長

奥 村 樹 郎 (おくむら たつろう)

㈲ドラムエンジニアリング 顧問

奥 平 幸 男 (おくだいら ゆきお)

㈲東京港埠頭公社埠頭建設部 施設第一課長

御手洗 義 夫 (みたらい よしお)

東亜建設工業㈱技術研究所地盤環境研究室 主任研究員

1. はじめに

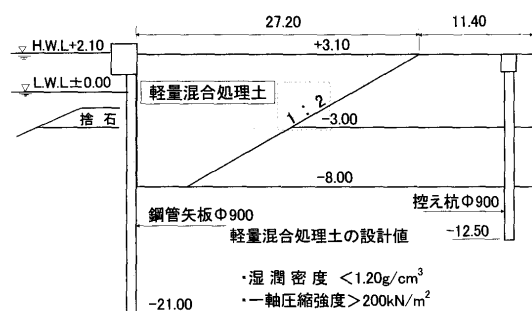
東京港の大井コンテナ埠頭では、物流の効率化を目指して、大型コンテナ船に対応できる高規格コンテナターミナルを建設する再整備計画を実施している。この計画には、レベル2地震動を受けても所期の機能を維持できる耐震強化栈橋の建設が盛り込んでいる。

平成11年度の大井埠頭新6バース護岸耐震補強工事では、耐震強化栈橋の背面護岸に軽量混合処理土（以下、軽量土と呼ぶ）を採用した。本文では、大水深への軽量土の施工実績とその適応性、それに至るまでの技術開発（密度管理方法、打設方法の開発）に関して報告する。

2. 工事概要および軽量土の技術的課題と対応

本工事は、前面の耐震強化栈橋と背面のコンテナヤードを結ぶ約30 m幅の耐震通路を2箇所確保するために、既設護岸の裏込め部を軽量土（施工数量：10 210 m³）に置き換え、地震時土圧の軽減を図ったものである。図一1に標準断面を示す。軽量土は現地発生土を加水してスラリー化した原料土に、界面活性系の気泡および高炉B種セメントを添加したものである。浚渫土や現地発生土等をリサイクル利用する軽量土は、阪神大震災の災害復旧工事¹⁾で本格的に使用されて以来、さまざまな技術的困難を克服して、空港・港湾施設での適用を重ねてきたが、本工事はその中でも最も難度の高いものであった。

本工事の軽量土に関する第1の技術的課題は、工事上の制約から、原料土を消泡の起こりやすい砂分の多い現場発生土に限定され、しかも、混練りプラントから打設位置まで約200 mと比較的長距離を圧送することである。



図一1 標準断面図

第2の課題は、約10 mの水深で施工することであり、水中打設時に生じる密度増加を正確に予測し、即応することである。従来、10 mの水深での打設は実験²⁾が行われたが、実工事¹⁾では水深約5 mまでであった。水深が大きい場合、水圧による気泡の収縮による密度増加が大きく、特に今回の場合は、大気中では海水よりも小さい密度の軽量土を水中打設する必要があった。

このため、まず現場発生土の分別を行い、量が少ない粘性土を分散・混合して活用し、さらにセメントの増粘効果も利用することで、水中分離抵抗性の向上を図った。次に室内試験と現場打設実験のデータに基づき、混練り～圧送～打設～養生という施工の各段階での密度変化を予測し、施工中における原料土の性状の変動や打設水深の変化にも対応できる密度管理方法を今回新たに開発した。また海水よりも小さい密度の軽量土を水中に打設できる新たなトレミー管を開発して使用した。

3. 軽量土の施工

硬化前の軽量土の密度が変化する要因には、①原料土の油分・有機分含有量等の原料土の物性による混練り時の気泡の消泡、②圧送による気泡の消泡、③打設時の材料分離、および、④水圧や拘束圧による気泡の収縮等が報告されている³⁾。しかしながら、各要因を個別に検討した事例は少なく、従来、それらの要因が複合したものとして一括して、密度増加量が予測されてきた。今回は、次に示す手順で密度増加量を分析的に評価した。

3.1 室内試験

軽量土の密度増加量は、下記に示すとおり、施工の各段階での密度増加量を加算した形（ $\Sigma \Delta \rho_{ti}$ ）で表される。

- $\Delta \rho_{t1}$: 原料土の物性および混練りによる密度増加量,
- $\Delta \rho_{t2}$: 混練り後の圧送による密度増加量,
- $\Delta \rho_{t3}$: 打設時の材料分離による密度増加量,
- $\Delta \rho_{t4}$: 打設後の水圧・拘束圧による密度増加量,
- $\Delta \rho_{t5}$: 硬化時の体積収縮による密度増加量,
- $\Delta \rho_{t6}$: 長期水浸による密度増加量

室内試験では、通常の配合試験に加えて、①水中分離抵抗性試験（水中打設時の材料分離特性を評価）、および②水圧養生試験（水圧による気泡の収縮量を予測するため、水中分離抵抗性試験試料に加圧）を行った。

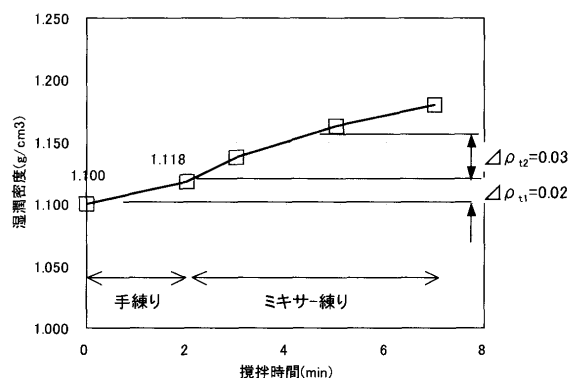
表一1に配合試験で用いた原料土の物理特性値、表一

表—1 原料土の物理特製（室内配合試験）

土粒子密度 (g/cm ³)	粒度組成 (%)				コンシステンシー (%)		有機物含有量(%)
	礫	砂	シルト	粘土	WL	WP	
2.711	0	4	50	46	77	32	3.8

表—2 配合表（水中分離抵抗性試験）

設計値		目標	基準配合（軽量土 1m ³ あたり）			
密度 (g/cm ³)	強度(q _w) (kN/m ²)	密度 (g/cm ³)	乾燥土 (kg)	海水 (kg)	固化材 (kg)	気泡 (l)
<1.2	>200	1.005	295	619	80	297



図—2 混練り時間とは湿潤密度の変化

2に設計基準値および配合表を示す。

有機分含有量(C_o)と混練り時の消泡量（消泡率）の間には次式の関係⁴⁾が得られている。

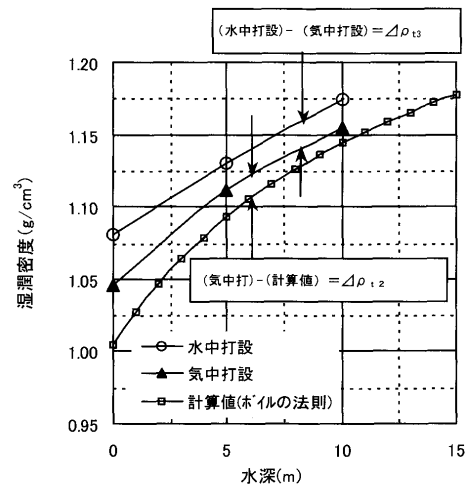
$$R = 4.3C_o - 1.9 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 R ：気泡の消泡率 $\%$ （＝消泡量／気泡混合量）

今回の場合、式(1)から消泡率は15%程度と予測される。これは $\Delta\rho_{t1} = 0.02 \text{ g/cm}^3$ に相当し、図—2の搅拌試験の結果（2分間の手練り時の密度変化）により、ほぼ妥当な値であることが確かめられた。

軽量土は混練りプラントから打設位置までポンプ圧送される。圧送管内の圧力は約200～300 kPa、速度は1.0～1.5 m/sである。今回の配管長さは約200 mであり、圧送時間は約2～3分間である。圧送中の軽量土の密度変化($\Delta\rho_{t2}$)は、室内試験で忠実に再現することは困難であるが、ミキサーで搅拌する時間を変化させて密度測定を行う試験を実施し、その結果（図—2）から、密度増加量として $\Delta\rho_{t2} = 0.03 \text{ g/cm}^3$ とした。

水中分離抵抗性試験および水压養生試験の結果を、図—3に示す。気中打設試料は水中打設せずに直接モールドに採取した後に所定の水圧が加えられた試料、水中打設試料は所定の圧力が加えられた容器中で水中分離抵抗性試験を行った試料（水压は維持したまま養生）である。この両者の差が水中打設に伴う材料分離による密度増加量であり、 $\Delta\rho_{t3} = 0.02 \text{ g/cm}^3$ が得られた。打設水深での拘束圧（水压）による密度増加量 $\Delta\rho_{t4}$ は、気中での気泡内の圧力を大気圧と仮定してボイルの法則を適用した値ではほぼ近似できる²⁾ことが示されており、今回もその



図—3 水中養生試験結果

妥当性が確認された。

打設後された軽量土の初期硬化体積収縮および長期水浸による密度増加量（それぞれ $\Delta\rho_{t5}$ 、 $\Delta\rho_{t6}$ ）を事前に室内試験で予測することは、規模と時間の制約から困難なので、従来の実績値¹⁾からやや安全側の値として、 $\Delta\rho_{t5} = 0.02 \text{ g/cm}^3$ 、 $\Delta\rho_{t6} = 0.03 \text{ g/cm}^3$ を用いることにした。

上記の室内試験結果等から、各施工段階での密度増加予測値として次の値を設定した。

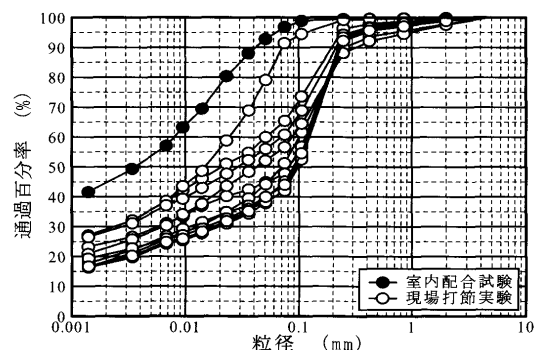
- （混練） $\Delta\rho_{t1} = 0.02 \text{ g/cm}^3$
- （圧送） $\Delta\rho_{t2} = 0.03 \text{ g/cm}^3$
- （打設） $\Delta\rho_{t3} = 0.02 \text{ g/cm}^3$
- （水压） $\Delta\rho_{t4}$ = 施工時の水深に合わせて計算
- （硬化） $\Delta\rho_{t5} = 0.02 \text{ g/cm}^3$
- （水浸） $\Delta\rho_{t6} = 0.03 \text{ g/cm}^3$

例えば、図—3では水深10 mの場合、 $\Delta\rho_{t4}$ は0.14 g/cm³となり、混練り時の軽量土密度は打設目標値よりも0.26 g/cm³軽くする必要がある。

3.2 現場打設実験

現場打設実験は、①実際の現場発生土と配合試験原料土の比較、②設定した各施工段階での密度変化量の妥当性の確認および修正、③気中密度が海水より軽い軽量土を水中に打設する際の施工性を確認する目的で実施した。

まず、現場で掘削された原料土は図—4に示したとおり、配合試験で用いた原料土と比較して砂分が多いものであった。砂分が多い原料土の場合、圧送・水中打設の際に材料分離が起こりやすく、場合によっては、ベント



図—4 原料土の粒度分布

表—3 現場打設実験の配合および結果（水深 9 m に打設）

ケース	混練り 密度	固化 材量	軽量土（原位置養生後、採取）				予測計算 した密度 （養生後）
			材令 3 日		材令 7 日		
			密度	強度	密度	強度	
	g/cm ³	kg/m ³	g/cm ³	kN/m ²	g/cm ³	kN/m ²	g/cm ³
1	0.92	120	1.171	319	1.176	692	1.197
2	0.89	120	1.143	303	1.116	434	1.174
3	0.86	120	1.126	246	1.122	583	1.151

ナイト等の増粘材の添加が必要となることがある。今回は、セメントが有する増粘効果を利用することにして、再度水中分離抵抗性試験を実施した。その結果、固化材添加量を配合試験での80 kg/m³ から120 kg/m³ に増量し、対応することで事前配合試験時と同等の $\Delta\rho_{13}$ を確保した。現場打設実験結果を表—3に示すが、ほぼ事前予測どおりの密度が確保されることが確認できた。

また、圧送された軽量土を圧送管内の圧力（200～300 kPa）を保った状態で打設できる新たなトレミー管を開発して使用した。これにより大気中では海水よりも小さい密度の軽量土を水中に打設することが可能となった。

3.3 本施工への適用

(1) 本施工での配合

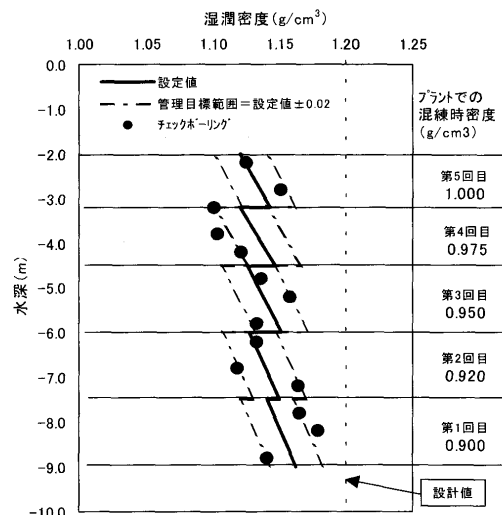
本施工では、原料土は掘削・仮置き時に目視と触手で選別を行い、砂分の多いものには細粒分の多いものを混合して使用した。また打設水深（平均打設深さと平均潮位の差）と図—4に示すような土質の変化に合わせて随時配合調整を行った。図—5にも示すが配合設定上は、長期の硬化や水浸による密度変化（ $\Delta\rho_{15}$ と $\Delta\rho_{16}$ ）を除いた値として $\Delta\rho_{11}\sim\Delta\rho_{14}$ までを考慮した $\rho_t=1.13\sim1.15$ （g/cm³）を配合設定値とした。

(2) ボーリング調査による密度の確認結果

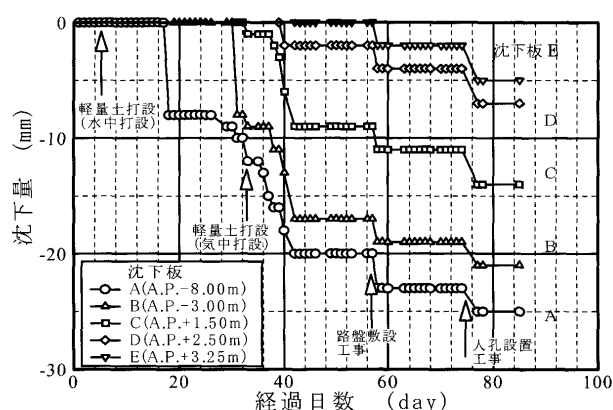
軽量土打設から28日経過後に行ったボーリング調査結果を図—5に示す。採取した軽量土の密度と、打設時に設定した管理目標値（範囲は ± 0.02 g/cm³）を併せて示す。軽量土の密度は管理目標範囲内にあり、施工管理の精度をよく表している。

(3) 硬化時の体積収縮（沈下）の検討（確認）

硬化時の体積収縮による密度変化（ $\Delta\rho_{15}$ ）を確認するため、実際の軽量土地盤に沈下板を設置し、沈下量を計測した。沈下板 A は改良地盤の下端に設置（原地盤の表面）し、その他の沈下板 B～E は軽量土を打設した翌日に軽量土の各打設面上に設置した。沈下板 A と各沈下板 B～E の沈下量の差が軽量土の沈下量を示すことになる。その結果は図—6に示すとおりで、軽量土中の沈下板（B～E）と沈下板 A の原地盤の沈下量は一致しており、打設 1 日以降の軽量土の沈下量はゼロに等しいことが確認された。したがって、当初予測した、硬化時の体積収縮による密度変化 $\Delta\rho_{15}=0.02$ （g/cm³）という値はほぼゼロとしてよいという結果となった。



図—5 ボーリング調査結果



図—6 軽量土沈下測量結果

4. まとめ

今回は、従来の2倍近い10 mの水深における軽量土の施工であったために、密度管理が重要であった。室内試験、現場打設実験によって、施工の各段階での密度変化量を詳細に設定することができ、本施工においてその値が妥当であることが確認された。また、大気中では海水の密度よりも小さい軽量土を水中打設する技術の開発によって、大水深への軽量土の施工が可能となった。

参考文献

- 1) 輪湖建雄・土田 孝・松永康男・濱本晃一・岸田隆夫・深沢 健：軽量混合処理土工法の港湾施設への適用，土木学会論文集，No. 602，VI-40，pp. 35～52，1998。
- 2) 土田 孝・佐藤孝夫・洪振舜・養作幸治・酒井浩二：水深10 mの海域における軽量混合処理土の現場打設実験と考察，港湾空港技術研究所資料，2001（印刷中）。
- 3) 鈛地盤工学会：軽量地盤材料の物性評価に関する研究委員会，委員会報告，軽量地盤材料の開発と適用に関するシンポジウム pp. 1～113，2000。
- 4) 及川 研・松永康男・池上勝己・安達 崇・竹内大輔・岸田隆夫：岸壁背後土圧軽減のための各種セメント処理土の特性，セメント系安定処理土に関するシンポジウム pp. 103～110，1996。

（原稿受理 2001.8.31）