

独立行政法人港湾空港技術研究所

# 港湾空港技術研究所 報告

---

REPORT OF  
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH  
INSTITUTE

---

Vol.48 No.2 June 2009

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

INDEPENDENT ADMINISTRATIVE INSTITUTION,  
PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

# 港湾空港技術研究所報告 (REPORT OF PARI)

第 48 卷 第 2 号 (Vol.48, No.2), 2009年6月 (June 2009)

## 目 次 (CONTENTS)

棧橋のライフサイクルマネジメントシステムの構築に関する研究 .....加藤 絵万・岩波 光保・横田 弘 .....3 ( Development of Life Cycle Management System for Open-type Wharf .....Ema KATO・Mitsuyasu IWANAMI・Hiroshi YOKOTA )
潮流と海浜流による砂と凝集性土砂の底質輸送と干潟の地形変化に関する 3次元数値モデルの開発と現地適用 .....鶴崎 賢一・栗山 善昭 .....37 ( Development of the Three-dimensional Numerical Model of Sediment Transports and Topographic Changes of Intertidal Flats due to Sands and Cohesive Sediments Generated by Tidal Currents and Wave-induced Currents and an Application to the Field. .....Ken-ichi UZAKI・Yoshiaki KURIYAMA )
関西国際空港海底粘土の長期圧密挙動に関するアイソタックモデルによる評価 .....渡部要一・田中政典・佐々真志・森川嘉之 .....63 ( Evaluation of Strain Rate Effect with Isotache Model on Long-Term Consolidation of the Clay Deposits at Kansai International Airport .....Yoichi WATABE・Masanori TANAKA・Shinji SASSA・Yoshiyuki MORIKAWA )
分割型圧密試験によって評価した関西国際空港海底粘土の圧密挙動に見られる層厚の影響 .....渡部要一・田中政典・佐々真志・江村 剛 .....83 ( Thickness Effects on Long-Term Consolidation Behavior of Osaka Bay Clays .....Yoichi WATABE・Masanori TANAKA・Shinji SASSA・Tsuyoshi EMURA )
東京国際空港D滑走路の事前海底地盤調査結果に関する一考察 .....渡部要一・田中政典・佐々真志・野口孝俊・宮田正史 ...103 ( A Study of the Geotechnical Investigation Results at the Planning Site of the D-Runway of the Tokyo International Airport Yoichi WATABE・Masanori TANAKA・Shinji SASSA・Takatoshi NOGUCHI・Masafumi MIYATA )
信頼性設計に基づく性能設計実現に向けた新しい地盤定数設定法の提案 .....渡部要一・田中政典・佐々真志・菊池喜昭 ...123 ( New Determination Method of Soil Parameters for Performance Based Design .....Yoichi WATABE・Masanori TANAKA・Shinji SASSA・Yoshiaki KIKUCHI )
沿岸域に用いた気泡混合処理土の長期安定性確認調査 .....渡部要一・田中政典・佐々真志 ...145 ( 10-Year Follow-up Study on Long-Term Properties of Air-Foam Treated Lightweight Soil Placed in Coastal Areas .....Yoichi WATABE・Masanori TANAKA・Shinji SASSA )
海上大気中における各種防食塗装による鋼材の防食効果と塗膜の健全性評価手法 .....審良 善和・岩波 光保・山路 徹 ...161 ( Performance of corrosion prevention by painting methods in marine atmosphere and performance evaluation methods for soundness of paint layers .....Yoshikazu AKIRA・Mitsuyasu IWANAMI・Toru YAMAJI )
任意形状スペクトルによる多方向不規則波の造波法の提案 .....平山 克也・宮里 一郎 ...199 ( Generation Method of Directional Random Waves with Arbitrary Spectrum .....Katsuya HIRAYAMA・Ichiro MIYAZATO )

## 沿岸域に用いた気泡混合処理土の長期安定性確認調査

渡部要一\*・田中政典\*\*・佐々真志\*\*

### 要 旨

近年、軽量化によりもたらされる高い付加価値に期待して、気泡混合処理土は沿岸域での施工実績を着実に伸ばしている。しかしながら、気泡混合処理土は不適切な現場環境の下では劣化が進行し、甚大な損傷を受ける可能性も有している。本研究では、気泡混合処理土（SGM）が沿岸域での工事において、本格的に利用された初期の代表事例である神戸港ポートアイランドおよび東京国際空港の護岸工事を取り上げ、実環境で養生された気泡混合処理土に対する劣化の有無を把握するために、打設から約 10 年間にわたり実施してきた一連の追跡調査結果を取りまとめた。その結果、気泡混合処理土の力学特性は、当該地盤に要求される十分な強度が維持されていること、また、経時的な劣化傾向は見られず、むしろ強度が増加する傾向にすらあることがわかった。これは一般的なセメント固化処理土に共通して見られる特徴と同様である。調査結果により、当該事例の気泡混合処理土は沿岸域の実際の現場環境の下で、10 年経過した今日でも安定した材料特性が維持されており、かつ、特段の劣化兆候も見られないことが確認され、土木材料として十分な長期耐久性を有していることが実証された。

**キーワード**：気泡混合処理土，軽量土，SGM，長期安定性，物理特性，力学特性

---

\* 地盤・構造部地盤研究領域土質研究チームリーダー

\*\* 地盤・構造部地盤研究領域土質研究チーム主任研究官

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人港湾空港技術研究所

電話：046-844-5053 Fax：046-844-4577 e-mail: watabe@ipc.pari.go.jp

## **10-Year Follow-up Study on Long-Term Properties of Air-Foam Treated Lightweight Soil Placed in Coastal Areas**

**Yoichi WATABE\***

**Masanori TANAKA\*\***

**Shinji SASSA\*\***

### **Synopsis**

Airfoam-treated lightweight soil (SGM) is a mixture of clay slurry, cement, and airfoam. This paper summarizes a 10-year follow-up study of the lightweight soil that was placed at Kobe Port Island and Tokyo International Airport in 1996. Sampling and laboratory testing were carried out in order to investigate the physical and mechanical properties and to compare those with the initial material condition. The depth profiles of bulk density, water content, and shear strength were examined. The results revealed that the shear strength of the airfoam-treated lightweight soil was sufficiently larger than the design value and the shear strength tended to increase with time. This tendency is consistent with that of general cement-treated soils. This result indicates that the quality of airfoam-treated lightweight soil has been stable since the initial placement (for more than 10 years) under a real-field environment; consequently, the lightweight soil has sufficient durability for use as geomaterial employed in construction at coastal areas.

**Key Words:** air-form treated lightweight soil, SGM, deterioration, long-term, mechanical properties, physical properties

---

\* Head of Group, Soil Mechanics and Geo-environment Research Group, Geotechnical Engineering Division,  
Geotechnical and Structural Engineering Department

\*\* Senior Researcher, Soil Mechanics and Geo-environment Research Group, Geotechnical Engineering Division,  
Geotechnical and Structural Engineering Department

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-46-844-5053 Fax : +81-46-844-4577 e-mail: watabe@ipc.pari.go.jp

## 目 次

要 旨 .....	145
1. はじめに .....	149
2. 工事概要 .....	149
2.1 神戸PI-2期 .....	149
2.2 羽田III期 .....	151
3. 調査概要 .....	151
3.1 サンプルング調査 .....	151
3.2 室内試験 .....	151
4. 追跡調査結果 .....	152
4.1 神戸PI-2期 .....	152
4.2 羽田III期 .....	156
5. 結論 .....	158
謝辞 .....	159
参考文献 .....	159

## 1. はじめに

近年の沿岸域における工事では、セメント固化による早期強度発現、ならびに、軽量性・自立性による沈下防止や土圧低減を期待できることから、気泡混合処理土（SGM）の利用が注目されている。2007年末までに、約500,000m<sup>3</sup>の施工実績があり、この中には、東京国際空港再拡張事業の国際線エプロン整備における鉄道シールドトンネル上部の埋立土として施工された約82,000m<sup>3</sup>が含まれる。また、現在施工中のD滑走路建設では、埋立構造の栈橋構造との接合部に約871,500m<sup>3</sup>の施工が計画されているなど、施工実績の伸びは著しい。

同処理土は、浚渫粘土や建設残土を原料土として、固化材と軽量化材を混合するものであり、工事発生土のリサイクル利用という観点からも大いに注目されている地盤材料である（土田, 1998; 渡部, 2004a; 渡部, 2004b）。しかし、これらの利点の一方で、水分の蒸発に伴う乾燥収縮、気泡内への水の浸入に伴う密度増加、酸性水の浸入に伴うアルカリ性水和物の中和が生じるなど、不適切な現場環境下に置かれると、劣化する可能性を秘めた地盤材料であることも最近の研究で明らかになってきた（渡部ら, 2007）。短期的には不適切とは言えない環境であっても、長期的な視点に立つと、土中でも地下水より上は乾燥したり、地下水より下は気泡への水が浸入したりといったことも懸念される。気泡混合処理土を今後も安定的に使用していくためには、実施工に用いられた同処理土の劣化の有無を長期にわたり追跡調査し、実際の現場環境の下での材料安定性を把握することが重要である。

1996年に施工された神戸港ポートアイランド第2期地

区岸壁の裏込め工事（以下、神戸PI-2期）や東京国際空港沖合展開第III期外周護岸裏込め工事（以下、羽田III期）では、開発されたばかりの気泡混合処理土が本格的に用いられた。これらの事例では、原位置における材料の長期安定性を把握するための追跡調査を10年間にわたり実施してきた。特に10年目に実施した調査では、過去に実施した調査項目にとどまらず、原位置試験を含めた多岐にわたる力学試験、物理試験を実施し、劣化の有無を多方面から調べた。

本論文では、追跡調査の結果について10年目の調査内容を中心に考察し、気泡混合処理土の長期安定性について得られた新たな知見を取りまとめる。

## 2. 工事概要

### 2.1 神戸PI-2期

本調査で対象とした神戸PI-2期地区の岸壁は、1995年1月の阪神・淡路大震災により被災した。地震発生当時は建設中で、裏込めが終了した段階まで施工されていた。護岸の水平変位やケーソンの沈下・傾き等に関して、被災時の変状が比較的小さかったため、既存のケーソンがそのまま利用された。その際、単に港湾機能を再生しただけにとどまらず、気泡混合処理土の本格的な使用により耐震性の向上も図られた。施設復旧断面を図-1に示す（輪湖ら, 1998）。護岸延長183mにわたり裏込め材として気泡混合処理土が用いられており、施工量は22,060m<sup>3</sup>（水中部・気中部の合計）であった。気泡混合処理土の上面は、細粒分12.1%を含んだ砂で覆土されており（覆土厚650mm）、覆土の上には舗装が敷設されている（舗装厚

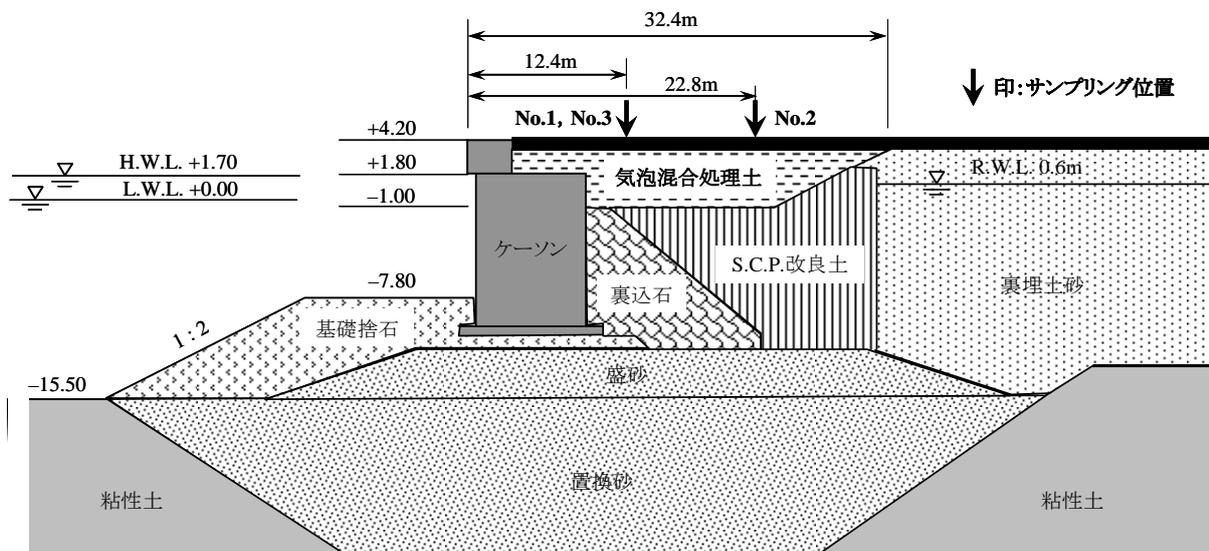


図-1 神戸PI-2期復旧断面

表-1 原料土の物理特性 (神戸PI-2期)

自然含水比 $w$ (%)	122.0	
土粒子密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.71	
湿潤密度 $\rho_t$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.39	
粒度組成 (%)	礫分	3.0
	砂分	14.0
	シルト分	54.0
	粘土分	28.0
液性限界 $w_L$ (%)	97.0	
塑性限界 $w_p$ (%)	41.0	
塑性指数 $I_p$	56.0	
強熱減量 $L_i$ (%)	8.8	
pH	8.1	

表-2 配合条件(神戸PI-2期) (1m<sup>3</sup>あたり)

項目	水中	気中
調整泥土 (kg)	952	849
固化材料 (kg)	140	
気泡量 (m <sup>3</sup> )	0.196	0.279
目標湿潤密度 $\rho_t$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.1	1.0
目標一軸圧縮強さ $q_u$ (kPa)	196	
設定フロー値 (mm)	120~180	

220mm)。また気泡混合処理土の下面は、1~200kg/個の裏込石および液状化対策としてのサンドコンパクションパイプ(S.C.P)による改良地盤である。

気泡混合処理土の母材として用いられた原料土は、同時期に実施された神戸PI-2期地区前面の航路泊地浚渫の海成粘土であり、固化材には高炉セメントB種が、気泡の作成に用いる起泡材には合成界面活性剤系のものが使用された。原料土の物理特性および配合条件を表-1、表-2にそれぞれ示す。強熱減量 $L_i$ が8.8%と海成粘土としては比

表-3 原料土の物理特性 (羽田III期)

自然含水比 $w$ (%)	39.2	
土粒子密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.69	
粒度組成 (%)	礫分	0.0
	砂分	19.0
	シルト分	56.0
	粘土分	25.0
液性限界 $w_L$ (%)	56.3	
塑性限界 $w_p$ (%)	22.3	
塑性指数 $I_p$	34.0	

表-4 配合条件(羽田III期) (1m<sup>3</sup>あたり)

調整泥土 (kg)	994
固化材料 (kg)	94
気泡量 (m <sup>3</sup> )	0.260
目標湿潤密度 $\rho_t$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.1
目標一軸圧縮強さ $q_u$ (kPa)	196
設定フロー値 (mm)	160以上

較的小さく、有機物含有量が少ないため(実測で3.02%)、有機物含有量が高い土に特徴的に見られるような混練時の消泡が少なく、気泡混合処理土に適した原料土であった(及川ら, 1996)。配合条件は、室内配合試験および現場打設実験の結果に基づいて決定された。なお、水中部の目標密度 $\rho_t$ は、長期の水浸の影響を考慮して、海水密度よりわずかに大きな1.1g/cm<sup>3</sup>と設定された。施工時には、水中部・気中部とも打設ポンプ配管の先端に $\gamma$ 線密度計を設置して、連続的な密度管理が行われた。なお、設定フロー値はポンプ圧送を想定した施工しやすさの指標であり、JHS A 313に規定された試験値(直径80mm、高さ80mmの円筒を用いたフロー試験後の試料の直径)である。

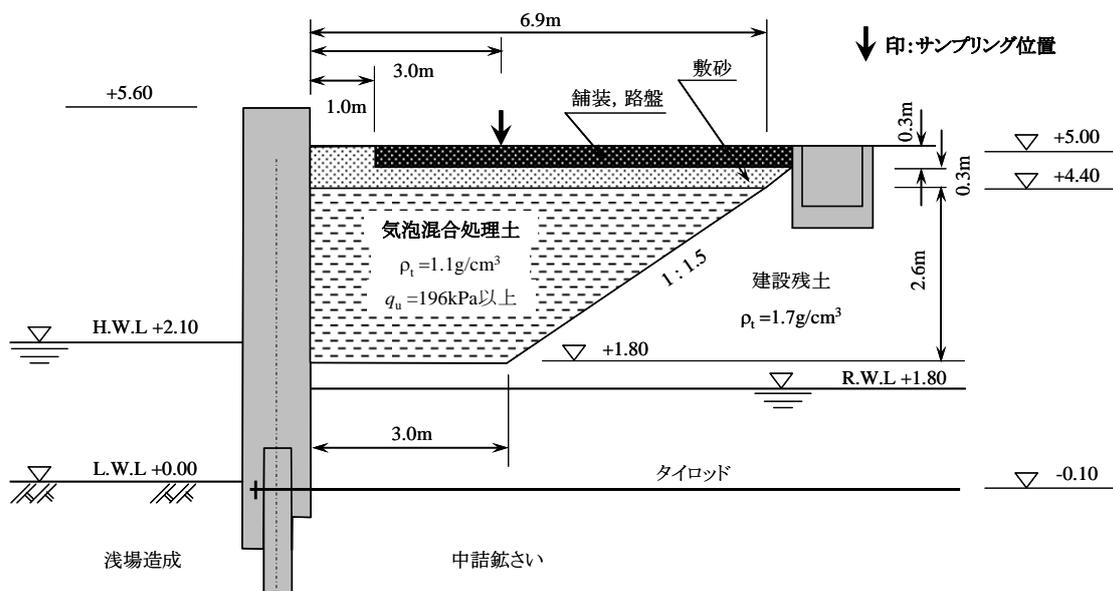


図-2 羽田III期施工断面

表-5(a) 神戸PI-2期における調査項目

試験項目	施工後経過月数					
	1	4	7	10	22	116
湿潤密度試験	○	○	○	○	○	○
含水比試験	○	○	○	○	○	○
一軸圧縮試験	○	○	○	○	○	○
弾性波測定						○
圧密試験	○	○	○	○	○	○
一面せん断試験	○	○	○	○	○	○
コーン貫入試験						○
pH試験						○
Ca含有量試験						○

表-5(b) 羽田III期における調査項目

試験項目	施工後経過月数			
	1	3	6	114
湿潤密度試験	○	○	○	○
含水比試験	○	○	○	○
一軸圧縮試験	○	○	○	○
弾性波測定				○
圧密試験				○
コーン貫入試験				○
pH試験				○
Ca含有量試験				○

## 2.2 羽田 III 期

施工断面を図-2に示す(土田ら, 2000)。調査対象である東京国際空港の外周護岸(東護岸)は, 新C滑走路建設に伴い従来からあった二重矢板式廃棄物埋立護岸を4mほど嵩上げた箇所である。嵩上げに伴い発生が予想された護岸背後の沈下や矢板に作用する土圧を低減させるため, 裏込め材として約1,000m<sup>3</sup>の気泡混合処理土が打設された。気泡混合処理土の上面は300mmの厚さで覆土が施されており, その上に厚さ300mmで路盤と舗装を敷設している。また, 下面は湿潤密度 $\rho_t = 1.7\text{g/cm}^3$ の建設残土(砂礫)である。

原料土には, 同時期に京浜急行電鉄空港線を空港ターミナルに延伸するために行われたシールドトンネル工事の掘削に伴う現地発生土が用いられた。原料土の物理特性を表-3に示す。原料土は脱水処理されていたため, 含水比 $w_n$ は液性限界 $w_L$ と塑性限界 $w_p$ のほぼ中間の値を示し, 一般の自然堆積粘土に比べると低含水比で硬質の沖積粘土であった。このため, 気泡混合処理土作製時には海水による解泥が行われ, 所定の含水比( $2.4w_L$ )に調整してから用いられた。

気泡混合処理土の配合条件を表-4に示す。施工時の目標密度 $\rho_t$ は $1.1\text{g/cm}^3$ であり, 固化材には高炉セメントB種が, 気泡の作成に用いる起泡材には合成界面活性剤系のものがそれぞれ用いられた。

## 3. 調査概要

### 3.1 サンプル調査

試料を目視により観察し, 室内試験に供するために, 神戸PI-2期では2005年11月13~18日に, 羽田III期では2005年8月5日にそれぞれ乱さない試料をサンプリングし, 湿潤状態を保った状態で20~25度で試料を保存し, 順次室内試験を実施した。実施数量は, 神戸PI-2期, 羽田III期ともにボーリングによるコアサンプリングを3地点ずつであり, 図-1, 図-2に示すように, 神戸PI-2期では岸壁法線より約12.4m(No.2)および約22.8m(No.1, No.3), 羽田III期では岸壁法線より約3.0mの位置にて実施した。また, 神戸PI-2期では3地点のコアサンプリングの他に, 近傍でのブロックサンプリング(30cm×30cm×40cm)も併せて実施した。これは, 空気との接触で乾燥による劣化の可能性のある覆土との境界面近傍を重点的に調べる目的で, 多数の供試体をトリミングできるブロック状の試料を採取したものである。

なお, コアサンプリングには, 乱れの少ない試料を採取するためにロータリー式チューブサンプリング(JGS 1223)を採用し, ロータリー式ボーリングによる掘進とともにコアパック内蔵の二重管サンプラーにより慎重に試料を採取した。また, ブロックサンプリングは, 気泡混合処理土の表面が現れるまで丁寧に覆土を掘削・除去した後, 地盤工学会基準(JGS 1231)に従って実施した。

### 3.2 室内試験

追跡調査で実施した室内試験の項目を表-5に示す。(a)神戸PI-2期, (b)羽田III期ともにサンプリングNo.1~No.3試料に対して, 試験対象とする部分を切り出して成形した後, 一軸圧縮試験(JIS A 1216), 圧密定体積一面せん断試験(JGS 0560-2000)(ただし, 神戸PI-2期のみ実施)および定ひずみ速度圧密試験(JIS A 1227)を実施した。また, セメント水和物の安定性を確認するために, pH試験とCa含有量試験を実施した。試験数量は採取試料の数量や延長および状態を考慮し, 1地点につき各3深度程度とした。

一軸圧縮試験や一面せん断試験に比べ供試体寸法を小さく抑えられ, 貫入抵抗から相対的な強度分布を推定できるコーン貫入試験(針貫入試験と類似であるが, 針ではなくコーン状のものを貫入する)も実施した。これは, 劣化の有無をより詳細に検討するために, 1地点3深度程度と数少ない強度特性パラメータに関する試験結果の補間的な役割を果たすものでもある。

試験方法は, 先端角30°のコーンチップを試料表面(成形面)から2mm/minで貫入させ, 貫入抵抗を測定するだけの



写真-1 コアサンプリング試料 (神戸PI-2期のNo.1)

簡易なものである。試料端面を成形さえできれば試験を実施できるので、より多くの深度においてデータを取得することが可能である（田中ら, 2005）。特に空気との接触の影響が懸念される覆土との境界面付近において、集中的に試験を実施した。今回の試験では最大貫入量を5mmとし、その時の貫入抵抗値をその深度における試料の代表値とした。試験は、気泡混合処理土の表面から0, 5, 10, 15, 20, 25, 50, 75, 100mmにおいて、また、これ以深では300mm程度の間隔で1深度あたりそれぞれ成形面上の3箇所で行った。

一方、物理試験は力学試験の供試体成形時に発生する削りカスを用いて、含水比試験、pH試験、Ca含有量試験を行った。また、成形後の供試体重量と体積から湿潤密度を算出する湿潤密度試験も実施した。

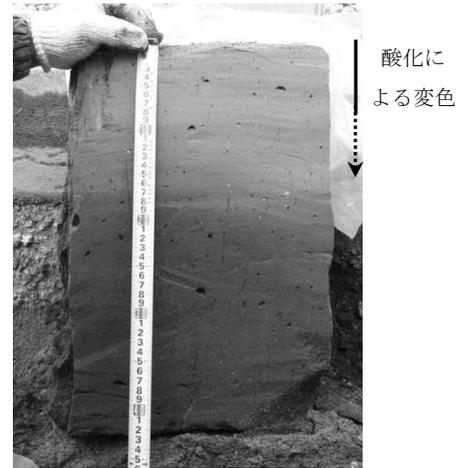


写真-2 ブロックサンプリング試料 (神戸PI-2期)

#### 4. 追跡調査結果

##### 4.1 神戸PI-2期

###### (1) 試料の観察

コアサンプリングおよびブロックサンプリングにより得られた試料状態の例を写真-1、写真-2にそれぞれ示す。コアサンプルでは、幾つかの試料片に割れているものの、室内試験に用いる供試体をトリミングするのに十分な大きさを確保できた。なお、ブロックサンプリングでは、このように試料が割れることはなかったことから、コアサンプリング時に試料が割れたと考えられる。各試料片

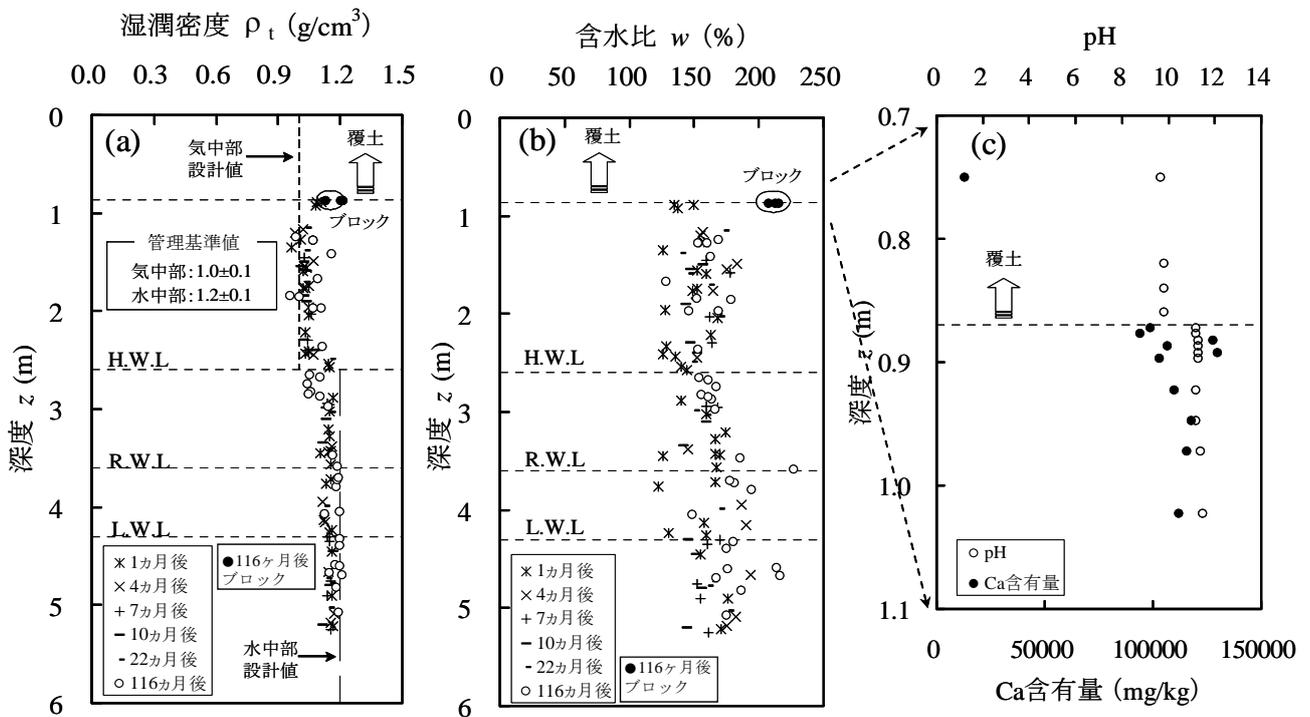


図-3 物理特性の深度分布 (神戸PI-2期): (a) 湿潤密度  $\rho_t$ ; (b) 含水比 w; (c) 表層部近傍の pH および Ca 含有量

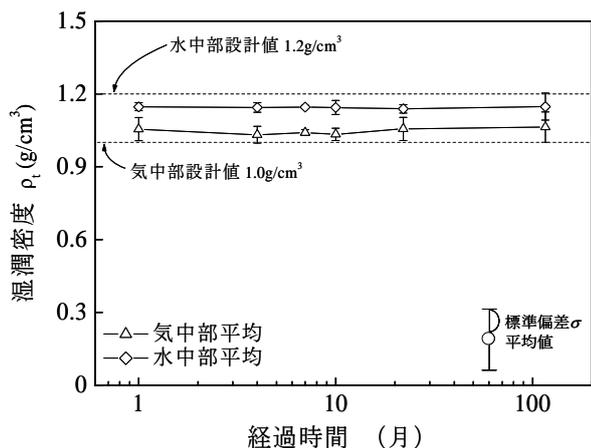


図-4 湿潤密度 $\rho_t$ の経時変化(神戸PI-2期)

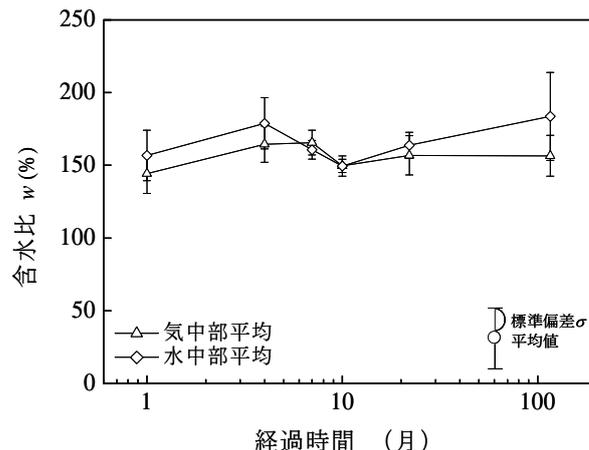


図-5 含水比 $w$ の経時変化(神戸PI-2期)

内にはクラックや目視レベルでの乾燥劣化等は観察されなかった。

一方、ブロックサンプルにおいても、目立った変化は目視レベルでは観察されなかった。表層から約150mmの範囲が褐色に変色していたが、これは、覆土との境界面が空気と接触したことにより酸化したためと思われる。

(2) 物理特性

物理特性について、(a)湿潤密度 $\rho_t$ 、(b)含水比 $w$ 、(c)覆土境界面付近のpHおよびCa含有量の深度分布を図-3に示す。湿潤密度 $\rho_t$ は、気中部(表層部からH.W.Lまでの範囲)に関する116ヶ月のデータに他よりもやや大きなばらつきが見られるが、全体を通じて目標密度(気中部 $\rho_t=1.0\text{g/cm}^3$ 、水中部 $\rho_t=1.1\text{g/cm}^3$ )に近い値を維持しており、深度に対して一様に分布している。なお、気中部の平均値は $1.05\text{g/cm}^3$ 、水中部の平均値は $1.15\text{g/cm}^3$ であり、変動係数CVは気中部で0.04、水中部で0.03であった。このことは、一部のデータは図中に示した長期経過時の目標管理基準値(輪湖ら、1998)よりも大きな値になっているものの、計測データの平均値±標準偏差の範囲は、目標管理値の範囲内にあることを示している。

一方、ブロックサンプルを用いた覆土境界面近傍(0~30mm)の $\rho_t$ は約 $1.2\text{g/cm}^3$ であり、目標値 $1.0\text{g/cm}^3$ を20%程度上回る結果となった。コアサンプルにおける覆土境界面近傍の $\rho_t$ でも同様の傾向が見られることから、雨水に起因する気泡への地下水浸潤の影響と考察される。しかしながら、覆土境界面のごく近傍に限定された現象であり、それ以深へは影響していない。このことはX線CTスキャナによる観察結果によって確認されている(菊池ら、2006)。

含水比 $w$ に関しては、120~200%の範囲に広く分布し、平均値は気中部で153%(飽和度 $S_r=75.8\%$ )、水中部で

168%(飽和度 $S_r=91.5\%$ )、変動係数CVは気中部で0.09、水中部で0.14となっていて、 $\rho_t$ と比べてばらつきが若干大きい。 $\rho_t$ が小さなばらつきで概ね目標値近くに管理されていたことから考えると、 $w$ のばらつきは、施工に用いた母材浚渫土の含水比のばらつきが直接反映された結果といえる。すなわち、原料土の粒度分布が変化して塑性が変わっても、軽量土としての重要特性である密度については、ばらつきの小さい均質な状態で施工できていたことが明瞭に示されている。なお、覆土境界面付近のブロックサンプルの含水比 $w$ の結果は、表面からの地下水浸潤の影響により、 $\rho_t$ の傾向と一致して他の結果よりも大きな値となっている。

(c)のブロックサンプルを用いて計測した覆土境界面近傍でのpHおよびCa含有量は、写真-2に示す覆土境界面での変色に対応した変化が懸念されたが、深度方向に有意な変化は見られなかった。これは、空気接触によるpHの低下(中性化)や溶脱によるCa含有量の減少がほとんど無かったこと、すなわち表面からの影響が内部にまでは及んでいないことを示唆している。したがって、覆土境界面のごく近傍で見られる湿潤密度 $\rho_t$ や含水比 $w$ の大きな値は、境界面からの吸水のみに起因しているものと推察され、化学的な特性の変化ではないと考えられる。

湿潤密度 $\rho_t$ の平均値、含水比 $w$ の平均値の経時変化を標準偏差( $\pm\sigma$ )の範囲とともに図-4および図-5に示す。 $w$ の116ヶ月の結果は、他と比べてばらつきが若干大きい。これは、図-3(b)に見られるように、深度 $z=3.6\text{m}$ および $4.7\text{m}$ 付近で著しく大きな値が計測された影響が現れているためであり、116ヶ月のデータが他の調査時期のデータより顕著にばらついていることを示すものではない。 $w$ の平均値は、7ヶ月から10ヶ月にかけて一旦小さくなるといった変化が見られる。しかし、経時的に単調な増減の傾向で

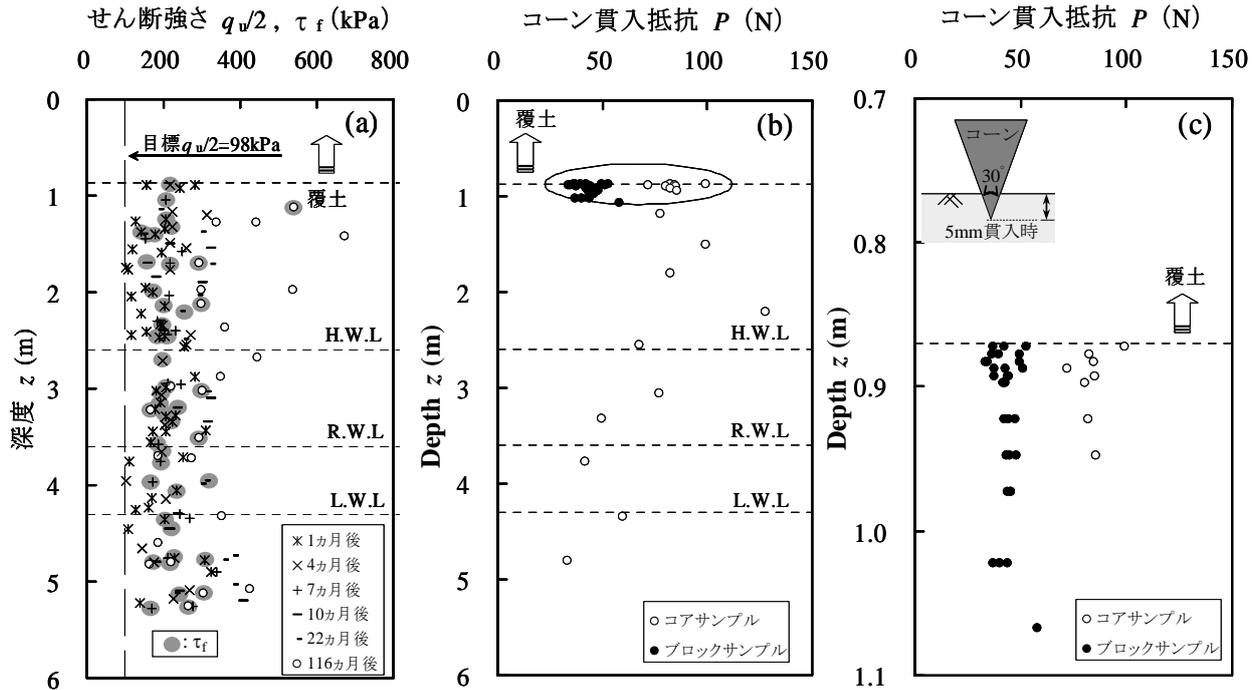


図-6 強度特性の深度分布(神戸PI-2期): (a) せん断強さ $q_u/2$ および $\tau_f$ ; (b) 整形面から5mm貫入時のコーン貫入抵抗 $P$ ; (c) 表層部におけるコーン貫入抵抗 $P$

はないことから、調査箇所の局所的な状況を反映した結果であり、ばらつきと考えることが妥当であると思われる。また、気中・水中ともに $\rho_t$ が経時的にそれぞれ約 $1.05\text{g/cm}^3$ 、約 $1.15\text{g/cm}^3$ で一定であることから、気泡混合処理土の物理特性は安定していたと考えられる。

(3) 力学特性

採取試料の力学特性として、(a)一軸圧縮試験から得られた非排水せん断強さ $q_u/2$ と一面せん断強さ $\tau_f$ 、および(b)コーン貫入抵抗 $P$ (5mm貫入時)の深度分布、ならびに(c)その拡大図を図-6に示す。 $q_u/2$ と $\tau_f$ の深度分布では、深度 $z = 1.0 \sim 3.0\text{m}$ の上部層(主に気中部)において116ヶ月のデータがやや高い強度を示す傾向が見られるが、気中部、水中部ともに全深度にわたって目標強度の98kPaを十分満足し、かつ、ほぼ一様である。一方、コアサンプルのコーン貫入抵抗 $P$ (5mm貫入時)の深度分布は、深度 $z = 1.0 \sim 3.0\text{m}$ の上部層では深度 $z = 3.0\text{m}$ より2倍程度高い抵抗を示した。(c)はコーン貫入抵抗 $P$ (5mm貫入時)の覆土境界面付近での分布を拡大して示したものであり、覆土境界面からの劣化進行に伴う強度低下の有無に着目している。ブロックサンプルの強度は、コアサンプルの強度に対して半分程度しか発揮されておらず、ブロックサンプルを採取した位置で劣化により局所的に強度低下しているようにも見える。しかしながら、ブロックサンプル、コアサンプルのどちらとも覆土境界面から200mmにわた

り一様な分布を示していることに加え、深部から採取したコアサンプルの貫入抵抗は上部から採取したブロックサンプルの貫入抵抗と同程度であることから、施工時からの強度のばらつきが現れた結果であるとも考えられる。実際、密度管理は目標密度前後の狭い範囲に入るように丁寧に行われた。一方、強度については、現場での即時的な対応ができないため、原料土の物理特性が不均質であることを見込んで、室内配合では目標一軸圧縮強さ $q_u$ の3倍に対応する配合を現場に適用することによって、目標一軸圧縮強さを下限値とする施工管理が達成できた。このため、初期の施工である当該現場の場合、ある程度

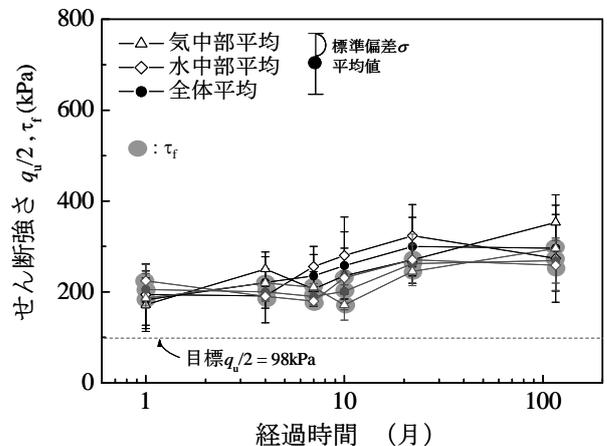


図-7 せん断強さ $q_u/2$ 、 $\tau_f$ の経時変化(神戸PI-2期)

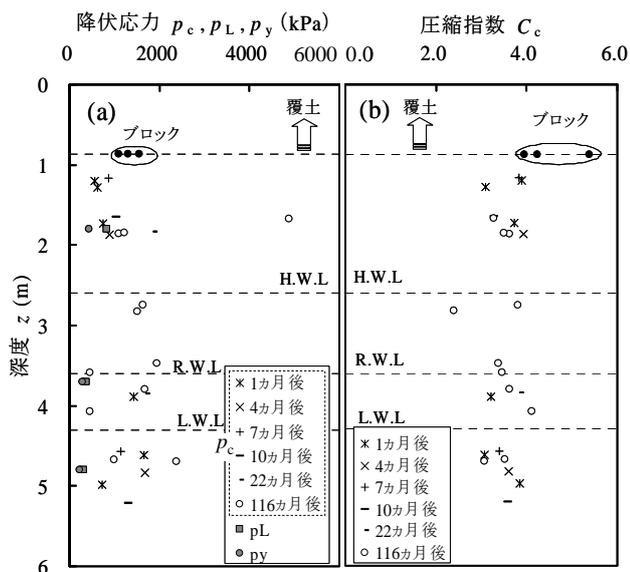


図-8 圧密特性の深度分布(神戸PI-2期): (a) 圧密降伏応力 $p_c$ ; 孔内水平荷試験における降伏応力 $p_y$ および極限応力 $p_L$ ; (b) 圧縮指数 $C_c$ 。

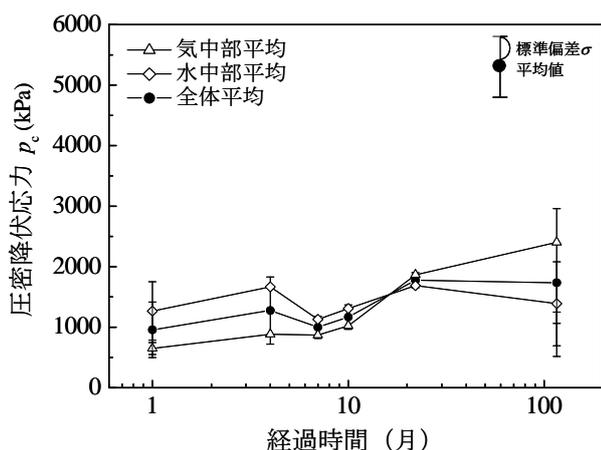


図-9 圧密降伏応力 $p_c$ の経時変化(神戸PI-2期)

のばらつきはやむを得ない。深度に対する一様な分布は、上述図-3(c)において示したpHやCa含有量の低下がないことと整合しており、覆土境界面からの強度劣化が進行していないことを示唆する結果である。

$q_u/2$ の平均値、 $\tau_f$ の平均値の経時変化を標準偏差(±σ)の範囲とともに図-7に示した。なお、平均値を算出する際には、 $q_u/2$ 、 $\tau_f$ とも450kPa以上の値を示したものはセメント攪拌不足等に起因したセメントの集中による異常な高強度であると考えられるので棄却した。水中部・気中部ともに劣化によると考えられるような経時的な低下傾向はなく、むしろ、一般的なセメント固化処理土に見られる増加傾向(池上ら, 2002)を示している。このことから、近年明らかになってきた乾燥(渡部ら, 2007)や乾湿繰返し

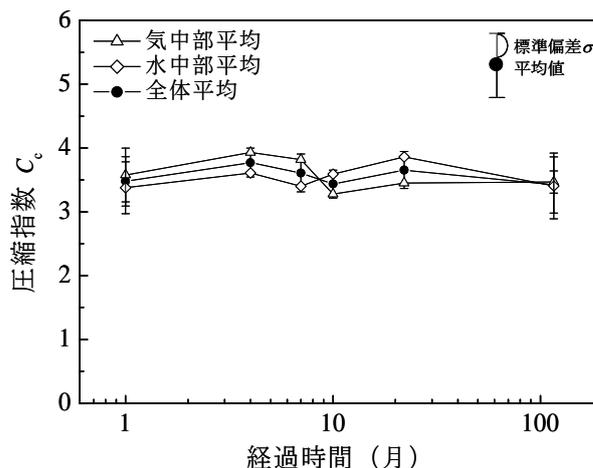


図-10 圧縮指数 $C_c$ の経時変化(神戸PI-2期)

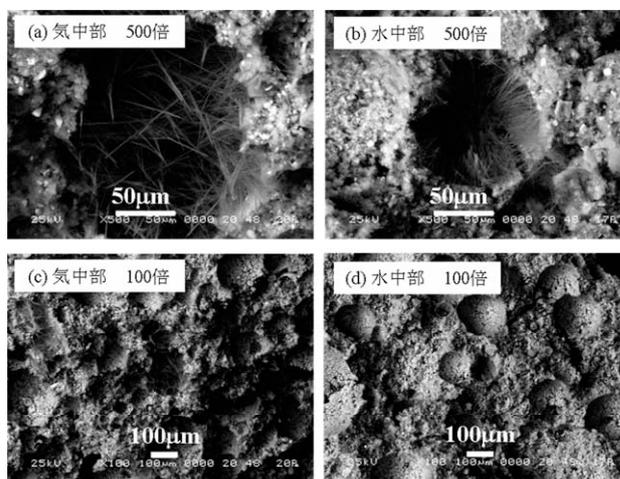


図-11 SEMによる内部構造の観察(神戸PI-2期)

(渡部ら, 2006)の劣化要因を覆土等により抑制した適切な現場環境の下で、気泡混合処理土が10年という長期にわたって安定した材料特性を維持し続けていることが読みとれる。

圧密降伏応力 $p_c$ および圧縮指数 $C_c$ の深度分布を図-8に示す。なお、図中には、116ヶ月に実施した孔内水平荷試験より求められた降伏応力 $p_y$ および極限応力 $p_L$ も併せて示したが、 $p_y$ と $p_L$ はほぼ等しく、 $p_c$ と比べると若干小さくなる傾向にある。深度 $z=1.5$ m付近での $p_c$ の結果が5000kPa程度と著しく大きいものも見られたが、概ね $p_c=500\sim 2000$ kPaの範囲内で深度方向に分布している。 $C_c$ は気中部・水中部ともにばらつきも小さく、一様な分布となっている。しかし、その平均値は約3.7もあり、一般的な日本の粘土の $C_c$ の範囲が0.5~1.4であること(土質工学会, 1979)を考慮すると著しく大きな値である。これは、Watabe et al. (2004)に示されているように、 $p_c$ を上回る

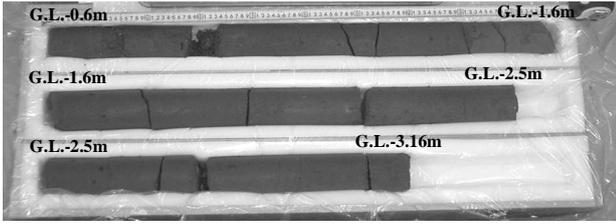


写真-3 コアサンプリング試料(羽田III期のNo.1)

荷重を受けた場合には、気泡が潰れて著しい沈下が発生することを意味している。

$p_c$ の平均値の経時変化を図-9に、 $C_c$ の平均値の経時変化を図-10に示した。なお、 $p_c$ の平均値算出にあたっては $q_w/2$ と同様、セメント攪拌不足による異常値として深度 $z=1.5\text{m}$ 付近の著しく大きなデータを取り除いている。 $p_c$ 、 $C_c$ ともに試験数量の違い(1ヶ月は6試料、4, 10, 22ヶ月は2試料、116ヶ月は11試料)が大きく反映されて、ばらつきが調査時期により異なっているように見える。しかし、平均値を見ると、 $C_c$ には経時的変化は見られず、 $p_c$ は7ヶ月で一旦減少しているが、それ以降は $q_w/2$ や $\tau_t$ といった強度特性の経時変化と同様に若干の増加傾向を示している。

#### (4) SEMによる内部構造の観察

微視的視点からの検討として、走査型電子顕微鏡(SEM)を用いて観察した試料の内部状態を図-11に示す。気中部・水中部ともに針状のセメント水和物であるエトリンタイトの発達が確認できる。エトリンタイトは、湿

潤状態で空気透過の少ない環境下において安定性の高い鉱物である(セメント協会, 1994)ことから、調査地点の現場環境が適切であり、強度劣化が発生していないことを裏付ける結果であるといえる。

## 4.2 羽田 III 期

### (1) 試料の観察

コアサンプリングにより得られた試料状態を写真-3に示す。深度位置によっては試料が細かく割れて分離し、力学試験に供するには十分な大きさが確保されていない部分も一部見られるが、それ以外では十分な大きさが確保されている。また、覆土との境界面(写真-3のG.L.-0.6m)から約100mmの範囲で褐色になっており、若干の変色も認められるが、神戸PI-2期と同様に酸化したものと推察される。また、ヘアクラック等の力学試験結果に悪影響を及ぼす要因は観察されなかった。

### (2) 物理特性

物理特性に関して(a)湿潤密度 $\rho_t$ 、(b)含水比 $w$ および(c) pHとCa含有量の深度分布を図-12に示す。湿潤密度 $\rho_t$ に関しては、 $1.3\text{g/cm}^3$ 以上の高い密度を示すデータも深度 $z=1.7\text{m}$ 付近で見られる。しかし、空気や水と接触する覆土との境界面近傍や下面近傍ではなく、内部で計測されたデータのみでこのような値が見られたことから、劣化や吸水に起因したものではなく、施工当初からもともと高い密度であったと考える方が自然である。このような特

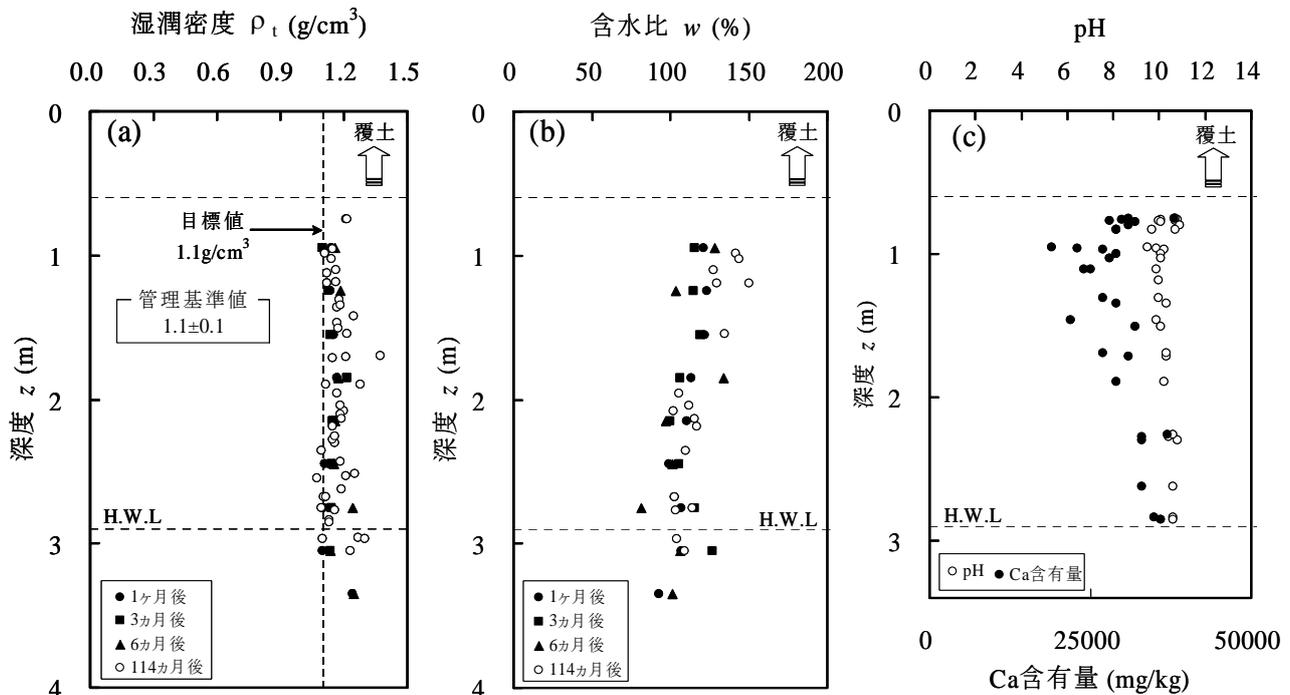


図-12 物理特性の深度分布(羽田III期): (a)湿潤密度  $\rho_t$ ; (b) 含水比 $w$ ; (c) pHおよびCa含有量

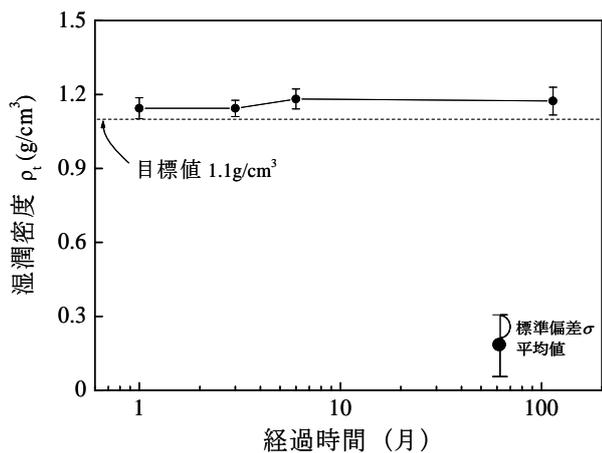


図-13 湿潤密度 $\rho_t$ の経時変化(羽田III期)

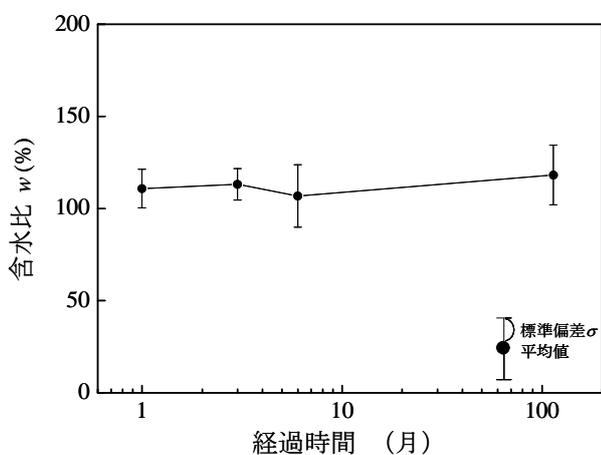


図-14 含水比 $w$ の経時変化(羽田III期)

異なるデータを除けば、多くの計測値は概ね目標管理基準値である $1.1 \pm 0.1 \text{ g/cm}^3$ の範囲にあり、深度に対してほぼ一様な分布である。

含水比 $w$ は表面付近(深度 $z = 1.0 \sim 1.8 \text{ m}$ )でやや高い値を示すが、 $2 \text{ m}$ 以深では $100\%$ 程度(飽和度 $S_r = 77.1\%$ )でほぼ一様に分布している。湿潤密度 $\rho_t$ は、含水比 $w$ の高い深度の方が小さくなる傾向にあるので、この高含水比は吸水が原因とは考えにくい。原泥の塑性の違い等に起因した施工当初からの分布であると考えられる。

$\text{pH}$ は深度方向に一様に分布しており、 $9 \sim 11$ の範囲(平均は $10.3$ )にある。一方、 $\text{Ca}$ 含有量は、わずかではあるが覆土境界面に近いほど少なくなる傾向にあることから、溶出の可能性も考えられる。セメント安定処理土において、 $\text{Ca}$ 溶出に伴う強度劣化があることは林ら(2004)により報告されているが、配合条件により劣化への影響度が異なることも指摘されている。したがって、この減少量が強度にどの程度の影響を与えているのかを定量的に評価することは難しい。また、 $\text{Ca}$ 含有量を長期にわたっ

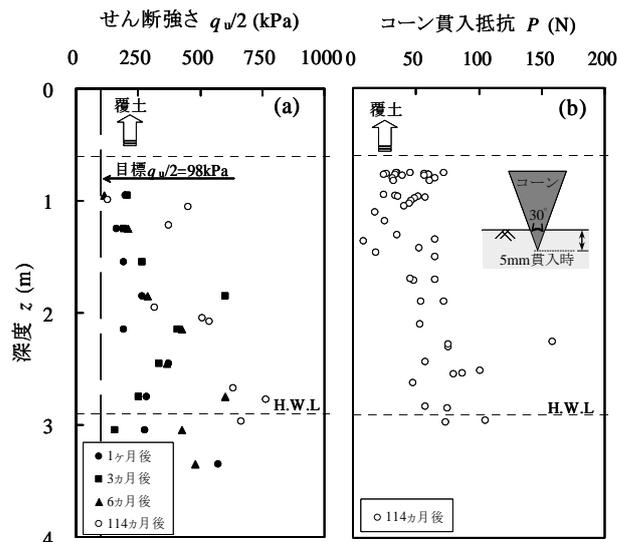


図-15 強度特性の深度分布(羽田III期): (a) せん断強さ $q_w/2$ ; (b) 整形面から $5 \text{ mm}$ 貫入時のコーン貫入抵抗  $P$

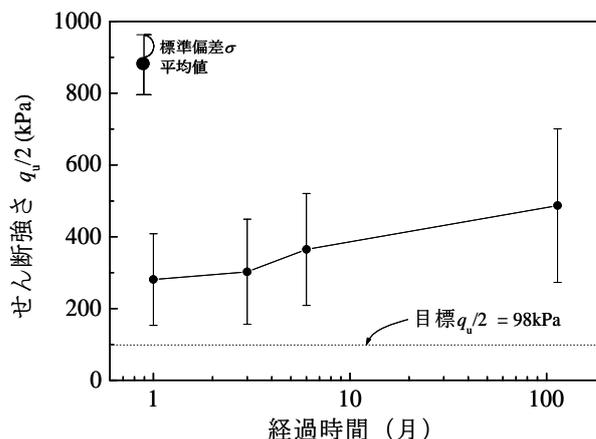


図-16 せん断強さ $q_w/2$ の経時変化(羽田III期)

て取得していないため、 $114$ ヶ月の調査のみのデータで経時的な溶出があるのか、それとも施工当時からのものであるのかを明確にすることも困難である。なお、配合条件(表-2と表-4)より、羽田III期は、神戸PI-2期に比べ固化剤の使用量が約 $35\%$ 少ないのに対し、計測された $\text{Ca}$ 含有量は約 $70\%$ も少なくなっており、 $\text{Ca}$ 含有量と強度特性との関係や、 $\text{Ca}$ の溶出などについて、引き続き調べていく必要があると思われる。

$\rho_t$ の平均値および $w$ の平均値の経時変化を標準偏差( $\pm\sigma$ )の範囲とともに図-13、図-14にそれぞれ示す。 $\rho_t$ に関しては、ばらつきの程度が調査時期の違いによらずほぼ一定であり、その平均値も管理範囲である $1.1 \pm 0.1 \text{ g/cm}^3$ 内にあり、経時的な変化もほとんどない。したがって、長期にわたり安定した湿潤密度を維持していることがわかる。一方 $w$ に関しては、 $6$ ヶ月および $114$ ヶ月で $1$ ヶ月や $3$

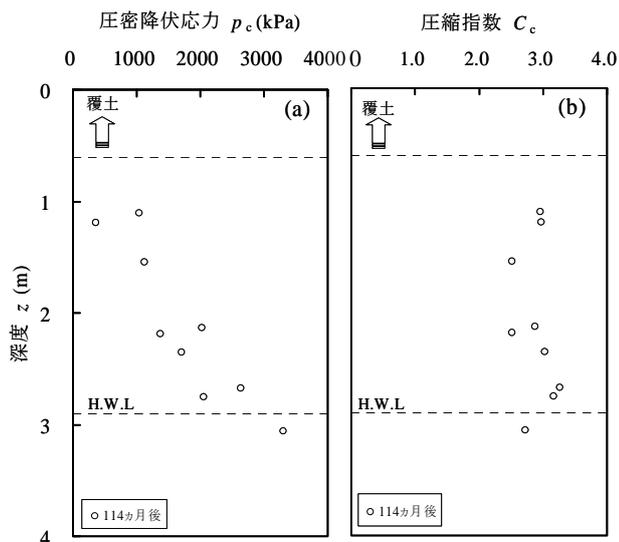


図-17 圧密特性の深度分布(羽田III期): (a) 圧密降伏応力 $p_c$ ; (b) 圧縮指数 $C_c$

ヶ月より標準偏差 $\sigma$ が約2倍に増加し、ばらつきが大きくなるが、平均値の変動に経時的に単調な増減の傾向がないことから、神戸PI-2期と同様、調査時の局所的な状況を反映した結果であると思われる。

(3) 力学特性

一軸圧縮試験より得られる非排水せん断強さ $q_u/2$ 、コーン貫入抵抗 $P$ (5mm貫入時)の深度分布を図-15に示す。 $q_u/2$ 、 $P$ のいずれも覆土境界面に近いほど小さくなる傾向が読みとれる。この傾向は、図-12(c)に示したCa含有量の分布傾向と似ている。しかしながら、覆土境界面付近の $q_u/2$ には約10年間にわたり経時的な低下は見られず、Caの溶出に起因する強度低下があるとは考えにくい。むしろ、上述のようなCa含有量の分布は、施工当初からのものであったと考え方が自然である。なお、図から読みとれるように、全深度にわたって目標強さ98kPaが満足されており、当該地盤に要求される十分な強度が維持された安定した状態にあることが示されている。

$q_u/2$ の平均値の経時変化を標準偏差( $\pm\sigma$ )の範囲とともに図-16に示した。114ヶ月の結果は他に比べてばらつきがやや大きい、神戸PI-2期と同様で平均値は経時的に増加しており、一般的なセメント固化処理土と同様の傾向(池上ら, 2002)にあることから、劣化の傾向は見られないことを確認できる。この結果は、現場環境を適切に制御して強度劣化の発生要因を取り除けば、気泡混合処理土が長期的に安定した状態を維持し続けることを示唆している。

定ひずみ速度圧密試験により得られた圧密降伏応力 $p_c$ および圧縮指数 $C_c$ の深度分布を図-17に示す。 $C_c$ は概ね

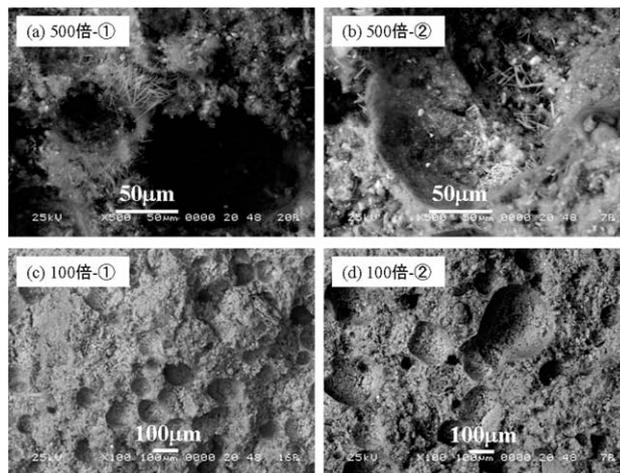


図-18 SEMによる内部構造の観察(羽田III期)

2.5~3.0の範囲にあり、神戸PI-2期の場合と同様に、一般的な粘土の $C_c$ の値より著しく大きい。これは、気泡混合処理土の特徴を良く表しており、圧密降伏後は気泡が圧縮するために急激な沈下を引き起こす可能性を示唆するものである。一方、 $p_c$ はせん断強さと同様に覆土境界面付近で小さく深度方向に増加する傾向にあるが、上述のように施工時からの分布と推察され、劣化に起因するものではないと考えられる。

(4) SEMによる内部構造の観察

走査型電子顕微鏡(SEM)を用いて観察した試料の内部の状態を図-18に示す。(c)、(d)の観察倍率100倍の画像を見ると、気泡の大きさ・形状や配置は比較的均質であり、適切な品質・施工管理がなされていたことが読みとれる。一方、(a)、(b)の500倍の観察結果を見ると、神戸PI-2期(図-11)と同様に、気泡周辺に針状のセメント水和物であるエトリングタイトの発達も確認でき、骨格構造が安定していることがわかる。この結果は、シールドトンネル掘削工事に伴う現地発生土をリサイクル利用した気泡混合処理土の材料特性が、上述のように長期にわたって安定していることをミクロ的な視点から裏付けるものである。

5. 結論

気泡混合処理土の原位置における劣化状況を把握し、材料としての長期安定性を検討するため、気泡混合処理土が沿岸域で本格的に使用された代表事例として神戸PI-2期および羽田III期を取り上げ、打設からおよそ10年にわたり、物理・力学特性の経年変化を調べる一連の追跡調査を実施した。施工から10年目に相当する最新の調査結果を中心に考察した結果、以下に示す新たな知見を結論として得た。

- 1) 気泡混合処理土の物理特性は、原料土の土質特性のばらつきを反映して、施工当時から潜在的なばらつきが確認されたが、経時的な変化の兆候は見られず、10年間経過した現在においても安定した状態を保っていることが確認された。
- 2) 調査対象とした気泡混合処理土は、護岸背後に打設され、かつ、覆土が施されている。このような一般的な使用状況の下で、空気との接触による乾燥劣化は見られず、吸水によると考えられる密度上昇は10年経過後も覆土境界面から約30mmの範囲内に抑えられていた。この調査結果により、沿岸域で覆土がなされるといった一般的な現場環境は気泡混合処理土地盤にとって適切であり、長期的に安定した材料特性を維持できることが実証された。
- 3) 気泡混合処理土の力学特性は、当該地盤に要求される十分な強度が維持されている。また、経時的な劣化傾向は見られず、むしろ強度が増加する傾向にすらある。これは一般的なセメント固化処理土に共通して見られる特徴と同様である。

しかしながら、乾燥や吸水を引き起こすような不適切な現場環境の下では、劣化することも懸念されていることを忘れてはならない。材料特性を正しく理解して、十分な覆土厚を確保するなど適切な環境下で使用することが重要である。

## 謝辞

現地調査を実施するにあたり、神戸PI-2期は近畿地方整備局、羽田III期は関東地方整備局からの多大なるご支援・ご協力をいただいた。また本研究における一部調査・試験の実施・結果の整理にあたっては、SGM軽量土工法協会にご協力いただいた。特に、同協会の三枝弘幸氏ならびに植田智幸氏には、依頼研修生として港湾空港技術研究所在籍中に実験等を実施していただいた。この他、本研究全般に関し、工法の開発から初期のフォローアップに携われた土田 孝教授（広島大学大学院）に多くのご助言を賜った。ここに記し、関係各位に感謝の意を表します。

## 参考文献

Watabe, Y., Itou, Y., Kang, M.-S. and Tsuchida, T. (2004):  
One-dimensional compression of air-foam treated lightweight

geo-material in microscopic point of view, *Soils and Foundations*,  
Vol.44, No.6, pp.53-67.

池上正春, 増田勝人, 一場武洋, 鶴谷広一, 佐藤茂樹, 寺師昌明,  
大石幹太 (2002): 深層混合処理工法により改良され20年を経過した海底粘土の物理特性ならびに強度, 土木学会第57  
回年次学術講演会, pp.123-124.

及川 研, 松永康男, 池上勝巳, 安達 崇, 竹内大輔, 岸田隆夫  
(1996): 岸壁背後土圧低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.

菊池喜昭, 渡部要一, 永留 健, 東島義郎, 直井秀市, 御手洗義  
夫 (2006): 神戸ポートアイランドの気泡混合処理土の長期  
安定性-X線CTスキャナによる内部構造の観察-, 第42回  
地盤工学研究発表会, pp.815-816.

セメント協会: セメント系固化材による地盤改良マニュアル[第  
二版](1994), pp.26-27.

田中洋輔, 御手洗義夫, 田中 徹, 渡部要一, 菊池喜昭, 山村和  
弘 (2005): 気泡混合処理土に対する針形状の異なる針貫入  
試験, 第40回地盤工学研究発表会, pp.823-824.

土田 孝 (1998): 沿岸域における軽量混合処理土工法の研究開  
発と適用事例, 港湾技術研究所講演会講演集, pp.1-43.

土質工学会 (1979): 土質試験法 (第2回改訂版), 第5編, 第4章, 圧  
密試験, pp.372-422.

土田 孝, 藤崎治男, 卷淵正治, 新舎 博, 長坂勇二, 彦坂周男  
(2000): 建設発生土を原料土とする軽量混合処理土の護岸  
工事への適用, 土木学会論文集, No.644/VI-46, pp.13-23.

林 宏親, 大石幹太, 寺師昌明 (2004): DJM改良杭のCa溶出とそ  
れに伴う強度低下の可能性, 第39回地盤工学研究発表会,  
pp.785-786.

輪湖建雄, 土田 孝, 松永康男, 濱本晃一, 岸田隆夫, 深沢 健  
(1998): 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.

渡部要一 (2004a): SGM軽量土工法, 土木技術59巻8号, pp.93-99.

渡部要一 (2004b): 港湾における軽量混合処理工法-SGM軽量  
土工法, 基礎工, pp.19-22.

渡部要一, 新舎 博, 塩田耕司, 渡邊雅哉 (2006): 暴露環境にお  
ける気泡混合処理土の強度特性(その1)-乾湿繰り返しに  
よる影響-, 第41回地盤工学研究発表会, pp.803-804.

渡部要一, 三枝弘幸, 植田智幸, 椎名貴彦, 白石保律, 村上智英  
(2007): 気泡混合処理土の劣化特性と抑制対策, 地盤工学  
ジャーナル, Vol.2, No.4, pp.311-318.

港湾空港技術研究所報告 第48巻第2号

2009・6

編集兼発行人 独立行政法人 港湾空港技術研究所  
発行所 独立行政法人 港湾空港技術研究所

横須賀市長瀬3丁目1番1号  
TEL.046(844)5040 URL.<http://www.pari.go.jp/>

印刷所 横浜ハイテクプリンティング株式会社

Copyright© (2009) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

## CONTENTS

Development of Life Cycle Management System for Open-type Wharf .....	Ema KATO, Mitsuyasu IWANAMI, Hiroshi YOKOTA .....3
Development of the Three-dimensional Numerical Model of Sediment Transports and Topographic Changes of Intertidal Flats due to Sands and Cohesive Sediments Generated by Tidal Currents and Wave-induced Currents and an Application to the Field. .....	Ken-ichi UZAKI, Yoshiaki KURIYAMA .....37
Evaluation of Strain Rate Effect with Isotache Model on Long-Term Consolidation of the Clay Deposits at Kansai International Airport .....	Yoichi WATABE, Masanori TANAKA, Shinji SASSA, Yoshiyuki MORIKAWA .....63
Thickness Effects on Long-Term Consolidation Behavior of Osaka Bay Clays .....	Yoichi WATABE, Masanori TANAKA, Shinji SASSA, Tsuyoshi EMURA .....83
A Study of the Geotechnical Investigation Results at the Planning Site of the D-Runway of the Tokyo International Airport .....	Yoichi WATABE, Masanori TANAKA, Shinji SASSA, Takatoshi NOGUCHI, Masafumi MIYATA .....103
New Determination Method of Soil Parameters for Performance Based Design .....	Yoichi WATABE, Masanori TANAKA, Shinji SASSA, Yoshiaki KIKUCHI .....123
10-Year Follow-up Study on Long-Term Properties of Air-Foam Treated Lightweight Soil Placed in Coastal Areas .....	Yoichi WATABE, Masanori TANAKA, Shinji SASSA .....145
Performance of corrosion prevention by painting methods in marine atmosphere and performance evaluation methods for soundness of paint layers .....	Yoshikazu AKIRA, Mitsuyasu IWANAMI, Toru YAMAJI .....161
Generation Method of Directional Random Waves with Arbitrary Spectrum .....	Katsuya HIRAYAMA, Ichiro MIYAZATO .....199