

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

土田 孝¹・藤崎 治男²・巻瀨正治³・新舎 博⁴・長坂勇二⁵・彦坂周男⁶

¹正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 (〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1)

²正会員 運輸省第二港湾建設局東京空港工事事務所長
(現在 (財) 国際臨海開発研究センター, 〒100-0013 千代田区霞が関 3-2-4)

³(財) 沿岸開発技術研究センター調査研究部長
(現在 鉄道建設公団国鉄精算事業本部, 〒105-8434 東京都港区西新橋 2-8-6)

⁴正会員 五洋建設(株)技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須郡西那須野町四区町 1534-1)

⁵正会員 (株) エス・エル・エス (〒110-0005 東京都台東区上野 3-10-10)

⁶太平洋セメント(株) (〒101-8357 東京都千代田区西神田 3-8-1)

本文は東京国際空港の外周護岸の嵩上げ工事において、既設の護岸に作用する土圧を軽減するため、シールド工事による発生土を原料土とした気泡混合処理土と発泡ビーズ混合処理土を裏込め材として使用した工事に関して報告するものである。実施工における品質管理試験の結果、軽量混合処理土は、原料土の土質の変化、プラント性能等によって品質にばらつきが生じるが、今回の事例では品質管理値の範囲内での製造と打設が可能であった。また、施工後に地盤としての特性を調べるためボーリングコアの一軸圧縮試験と3種類の原位置試験を行った結果、軽量混合処理土による地盤は空港外周道路の路床として妥当な地盤特性を有することが確認された。

Key Words : light-weight soil, form treated soil, beads treated soil, cement treated soil, density

1. はじめに

近年港湾や海上空港での利用を目的とした軽量混合処理土の開発が進められている^{1)~3)}。これらの軽量混合処理土は、浚渫粘土や建設残土を液性限界以上の含水比でスラリー化した原料土に固化材と軽量化材を混合するもので、増粘剤を加えずに海水中において直接施工できる点に特徴がある。平成8年には神戸港において浚渫土を原料土とする気泡混合処理土約22,000m³が岸壁背後の裏込め材としてが使用されるなど、実際の工事への適用がみられるようになってきた^{4), 5)}。

軽量混合処理土の密度と強度は配合によって調整できるが、一般に港湾や海上空港の工事では密度 $\rho_1 = 1.0 \sim 1.2 \text{g/cm}^3$ 、一軸圧縮強さ $q_u = 2.0 \sim 6.0 \text{kgf/cm}^2$ (196 ~ 588kN/m²)の範囲で設定するのが普通である。岸壁や護岸の背後に軽量混合処理土を用いると、軽量であることによって基礎地盤の沈下が防止でき、軽量混合処理土に自立性があるため護岸に作用する常時及び地震時の土圧が減少する。また、現地発生土を原料土として活用する場合は土砂処分費や良質土の購入費が不要

となるので建設コストを低減できる可能性が高い。

平成8年5月、東京国際空港沖合展開第Ⅲ期事業においてシールド工事の発生土を原料とする軽量混合処理土が外周護岸の背面埋立に適用された。本工事は空港整備事業における軽量混合処理土工法の初の適用事例であった。本文は、工事の概要と施工中に得られた試験結果をまとめるとともに、施工後に実施した軽量混合処理土地盤の一連の調査結果について考察したものである。

2. 工事の概要

東京国際空港の東京湾に面した外周護岸は、もともと二重矢板式の廃棄物埋立護岸として建設されたものであり、その位置図を図-1に示す。新C滑走路の建設により空港の外周護岸として整備する上で、越波容量を減少させるため護岸の天端を4m嵩上げする必要が生じた。嵩上げによる護岸背後の沈下及び既設の矢板構造に作用する地震時土圧を検討した結果、護岸背後の軽量化が必要となったため軽量混合処理土による裏込

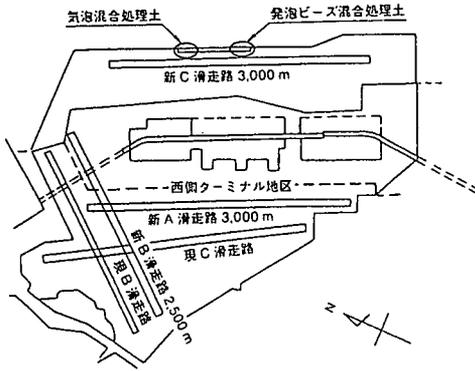


図-1 東京国際空港外周護岸の位置図

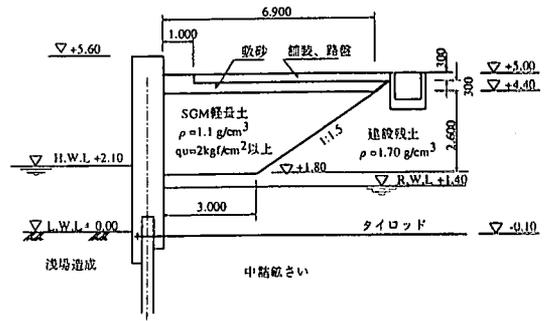


図-2 施工断面図

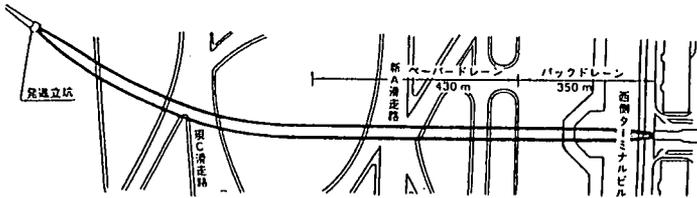


図-3(a) シールドトンネルの平面線形

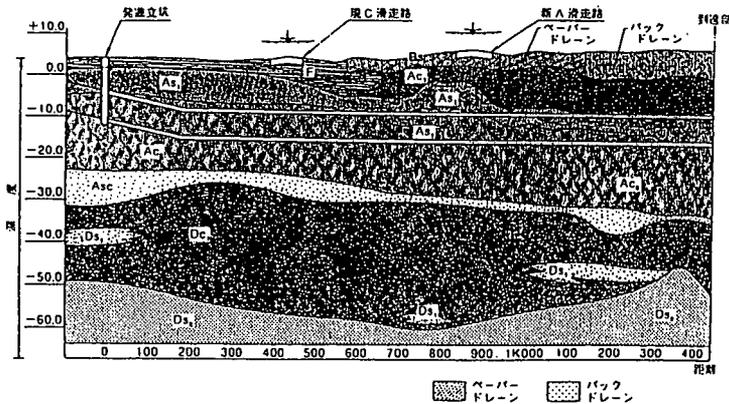


図-3(b) 地質構成図

め工を施工した。図-2に、本工事の施工断面図を示す。軽量混合処理土としては、軽量化材として気泡を用いる気泡混合処理土と、直径3mm程度のEPSビーズを用いる発泡ビーズ混合処理土の2種類を施工した。施工した護岸延長は気泡混合処理土、発泡ビーズ混合処理土ともそれぞれ75mの区間である。いずれも気中で、厚さ2.6mを数層に分けて施工し、断面1mあたりの軽量混合処理土の施工数量は $13\text{m}^3/\text{m}$ 、総施工量は気泡混合処理土、発泡ビーズ混合処理土それぞれ約 $1,000\text{m}^3$ であった。なお、発泡ビーズ混合処理土を気泡混合処理土と比べると、軽量化材料（EPS）のコストは大きいですが、気泡混合処理土のように施工中の消泡や圧力による縮

泡を考慮する必要がないため軽量化を達成しやすく、密度管理が容易であるという特徴がある。

原料土としては、同時期に京浜急行電鉄羽田線を空港ターミナルに延伸するために施工されていたシールドトンネル工事による発生土を利用した。図-3(a)、図-3(b)は、それぞれシールドトンネル区間の平面線形と地質構成図である⁶⁾。今回の工事に使用したのは発進立坑から220mの範囲であるので、掘削土はすべて沖積粘土層（ A_{c2} 層）である。

護岸背面の軽量化範囲は、既設矢板に作用する地震時土圧の計算結果から軽量混合処理土の密度を 1.2g/cm^3 として検討し、図-2の断面図のように設定した。なお、

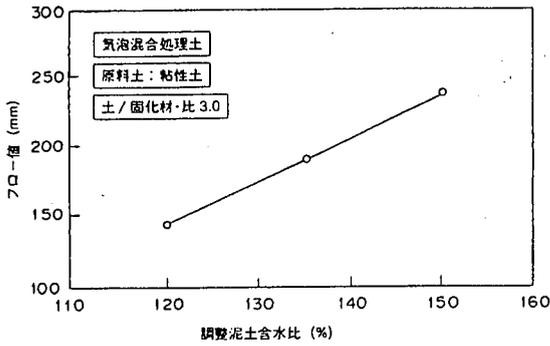


図-4 調整泥土含水比とフロー値の関係 (気泡)

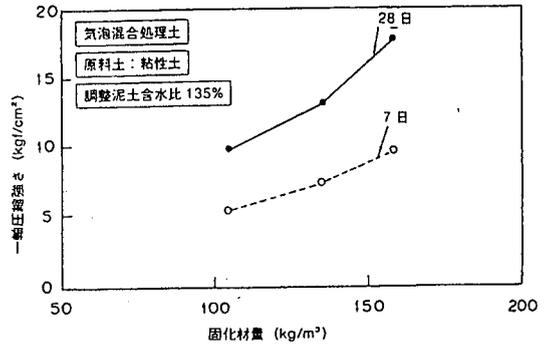


図-6 固化材量と一軸圧縮強さの関係 (気泡)

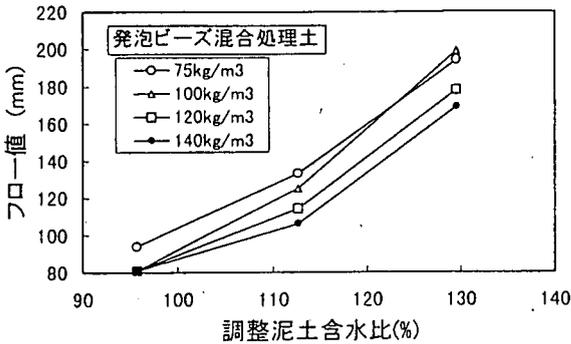


図-5 調整泥土含水比とフロー値の関係 (発泡ビーズ)

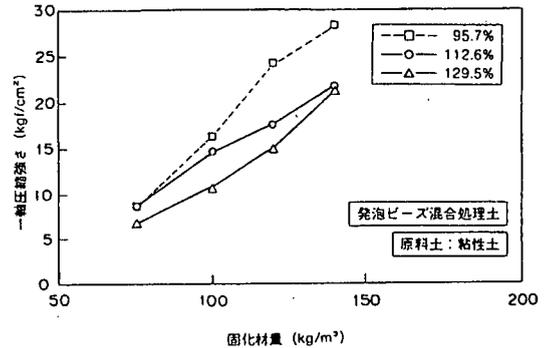


図-7 固化材量と一軸圧縮強さの関係 (発泡ビーズ)

表-1 原料土の土質特性

	自然含水比 (%)	土粒子の密度 (g/cm³)	粒度構成 (%)				液性限界 (%)	塑性限界 (%)	塑性指数
			礫分	砂分	シルト分	粘土分			
シールド泥土 (脱水処理土)	39.2	2.693	0	19	56	25	56.3	22.3	34.0

軽量混合処理土を含む地盤の土圧の計算には、筆者らが開発した分割法による土圧算定法^{7), 8)}を使用した。軽量混合処理土の設計強度は、空港外周道路の路床面となることからCBR10%を確保するため、一軸圧縮強さ $q_u = 2.0 \text{ kgf/cm}^2$ (196 kN/m^2) 以上とした。

3. 原料土と配合設計

軽量混合処理土の原料土として使用した発生土は、泥水加圧式シールドにより掘削され、排泥水を凝集剤により沈殿させ、フィルタープレスによって脱水処理したものである。

原料土の土質特性を表-1に示すが、脱水処理されているため含水比は液性限界と塑性限界のほぼ中央の値であり、自然堆積粘土の場合に比べて低含水比で硬い。このため、海水で解泥して所要の含水状態とし、軽量混合処理土を作製した。

軽量混合処理土を均一に打設するには施工時に適切な流動性を有する必要がある。気泡混合処理土において乾燥土量と固化材量の比を3:1とした場合の調整泥土含水比とフロー値の関係を図-4に示す。なお、フロー試験では、水平な40cm四方の亚克力板の中央に内径8cm×高さ8cmの円筒状の容器を置き、その中に気泡混合処理土を流し込み、上面を均した後に静かに容器を上方に引き上げて広がった混合処理土の最大径とその直角方向の径を測定してその平均値をフロー値とした。図-4のように含水比とともにフロー値は直線的に増加するが、気中打設の場合、フロー値180mm程度が望ましいので、図より原料土の調整泥土含水比を135%と決定した。この含水比は原料土の液性限界の2.4倍に相当する。

図-5は発泡ビーズ混合処理土における調整泥土含水比とフロー値の関係である。施工性の観点からはフロー値は180mm程度が望ましいが、フロー値が160~200mmである含水比130%の場合にはビーズの一部に分離が観察された。この結果より、施工性は低下するが分離の起きない含水比として113% (液性限界の2倍) を調整泥土含水比と決定した。

図-6は気泡混合処理土における固化材量と一軸圧縮強さの関係である。設計値として $q_u = 2.0 \text{ kgf/cm}^2$

表-2 設計配合

	配 合				密度 (g/cm ³)	フロー値 (mm)
	乾燥土 (kg/m ³)	水 (kg/m ³)	固化材 (kg/m ³)	軽量化材 (g/m ³)		
気泡混合処理土	423	571	94	260	1.1	160以上
発泡ビーズ混合処理土	478	538	75	268	1.1	120以上

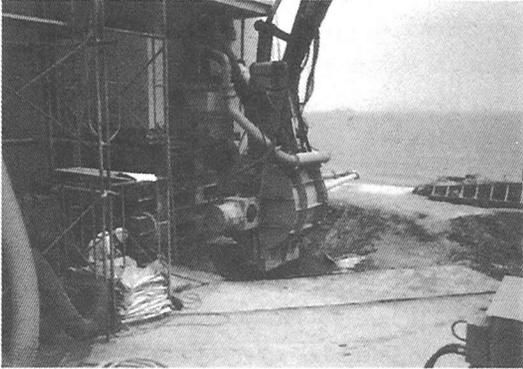


写真-1 発泡ビーズ混合処理土の製造に使用したミキサ

(196kN/m²)としたが、室内配合試験と現場施工の条件の違いや、原料土の土性や施工精度によるばらつき等を考慮して、室内配合試験において6.0kgf/cm² (588kN/m²)の一軸圧縮強さが得られる固化材量を用いることとし、94kg/m³ (921N/m³)と決定した。同様に、図-7は発泡ビーズ混合処理土における固化材量と一軸圧縮強さの関係である。図をみると、調整泥土含水比113%において材令28日の一軸圧縮強さ6.0kgf/cm² (588kN/m²)を発現するのに必要な固化材量75kg/m³ (735N/m³)を下回るが、これまでの実績から固化材量が75kg/m³ (735N/m³)以下になると混合によるばらつきが大きくなることを考慮して、固化材量は75kg/m³ (735N/m³)とした。

表-2は2種類の軽量混合処理土の設計配合である。地震時土圧を低減するための設計上の密度を1.2g/cm³としたが、施工時の目標密度は密度変化を考慮してを1.1g/cm³と設定した。このために必要となる軽量化材の容積は、気泡混合処理土では260ℓ/m³、発泡ビーズ混合処理土では268ℓ/m³となった。固化材には高炉セメントB種、気泡は合成界面活性剤系起泡剤を10倍希釈し20倍発泡したものを用いた。発泡ビーズは発泡倍率80倍のEPSビーズ(見かけ密度0.0125g/cm³)を用いている。

4. 施工方法と施工中の品質管理

2種類の軽量混合処理土の製造には、それぞれ異なる

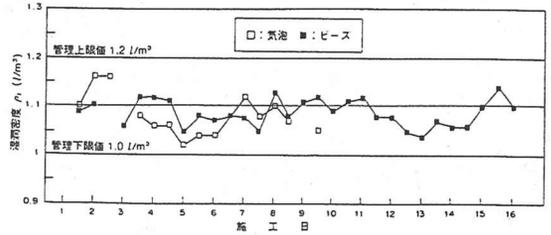


図-8 混練直後の密度の経時変化

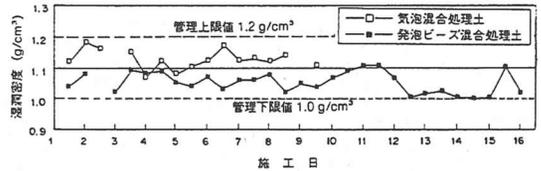


図-9 養生固化後の密度

った形式の施工機械を使用した。気泡混合処理土の場合は連続式プラントであり、原料土の解砕、含水比調整、固化材及び気泡の混合、ポンプ圧送を連続して行い、打設した。発泡ビーズ混合処理土の場合はバッチ式(1 m³)プラントであり、ミキサに所定量の原料土、海水、固化材、EPSビーズを投入し、一定時間混練後圧送ポンプで圧送し、打設した。写真-1は発泡ビーズ混合処理土の製造に使用したミキサである。1回当たりの打設高さはそれぞれ50cmであり、護岸の延長方向に連続して打設した。

気泡混合処理土、発泡ビーズ混合処理土それぞれ1000m³を打設するのに要した施工期間は9日間及び16日間であった。

軽量混合処理土は、原料土の土質の変化、混合プラントの計量精度と混合性能などによって、実施時には密度や流動性、強度が変化する可能性がある。特に今回の事例では原料土がシールド工場の発生土であったため、施工中の土質の変動が予想され、それらに対応した処理土の製造が可能かどうかが課題であった。製造時の処理土が所要の品質を満足していることを確認するため、混練直後にプラントから1日2回処理土を採取し、密度試験、フロー試験、一軸圧縮試験を行った。これらの結果をまとめると以下ようになる。

(1) 密度とフロー値

図-8は混練直後の密度の経時変化である。混練直後

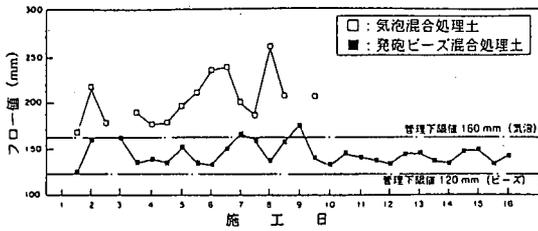


図-10 混練直後のフロー値の経時変化

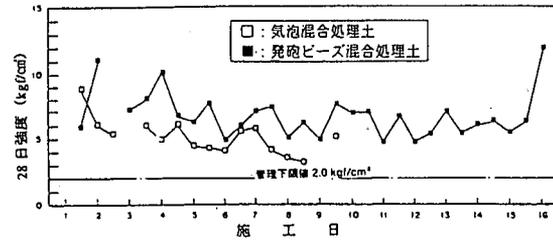


図-11 養生後の一軸圧縮強さ

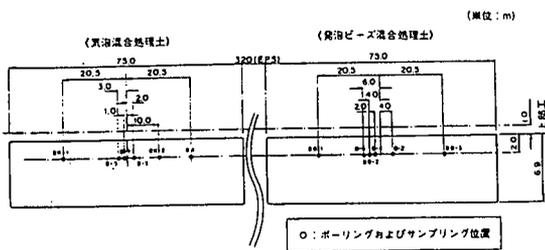


図-12 施工後のボーリング及び原位置試験位置図

において気泡混合処理土の密度は $1.02 \sim 1.16 \text{ g/cm}^3$ の範囲で変動しており、密度管理値である $1.1 \pm 0.1 \text{ g/cm}^3$ の範囲内にあった。一方、発泡ビーズ混合処理土では $1.04 \sim 1.14 \text{ g/cm}^3$ の範囲にあり、気泡混合処理土とはほぼ同様であった。

図-9は一軸圧縮試験用のモールド試料から求めた材令28日の密度である。気泡混合処理土は混練直後に比べ養生後に密度が $0.01 \sim 0.09 \text{ g/cm}^3$ の範囲で増加がみられ、平均では 1.13 g/cm^3 となって当初目標密度 1.1 g/cm^3 よりもやや大きかった。これに対して発泡ビーズ混合処理土では密度は混練直後よりもやや減少しており、平均では 1.05 g/cm^3 であった。気泡混合処理土の密度が養生後に増加する現象は、室内試験や神戸港の事例でもみられている。固化後の密度は安定しているのに、密度変化の原因は固化に伴う収縮により試料内の気泡が縮小したためと考えられる^{2) 4)}。

一般に、原料土が同じ場合には気泡混合処理土の方が発泡ビーズ混合処理土よりも流動性は大きい。この

湿潤密度 ρ_t (g/cm^3)

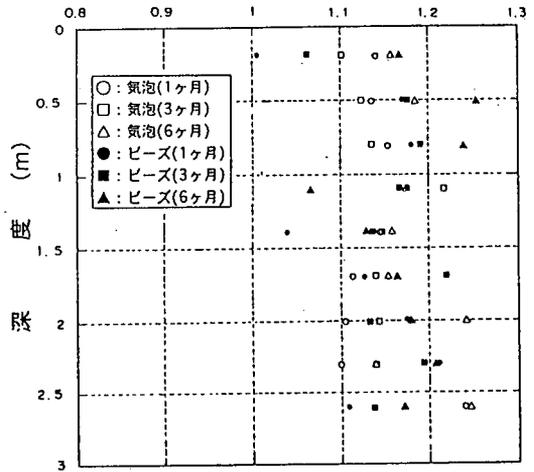


図-13 湿潤密度と深度の関係

ため、今回はフロー値の管理下限値を気泡混合処理土では 160 mm 、発泡ビーズ混合処理土は 120 mm とした。図-10は各施工日における混練直後のフロー値である。図で示すように気泡混合処理土、発泡ビーズ混合処理土ともにフロー値は管理下限値よりも大きく所要の流動性が確保できた。図をみると密度に比べフロー値のばらつきが相当大きいことがわかる。

(2) 養生後の強度

養生後の強度は、 $\phi 5 \text{ cm} \times \text{h}10 \text{ cm}$ のモールドに混練直後の試料を充填し、28日密封養生後、一軸圧縮試験を実施して求めた。図-11に養生後の一軸圧縮強さを示す。設計値(管理下限値)である $q_u = 2.0 \text{ kgf/cm}^2$ (196 kN/m^2) よりもいずれも十分大きく、平均強度は気泡混合処理土、発泡ビーズ混合処理土でそれぞれ 5.26 kgf/cm^2 (515 kN/m^2)、 6.95 kgf/cm^2 (681 kN/m^2) であった。これらの強度は室内配合試験の目標値であった 6.0 kgf/cm^2 (588 kN/m^2) に近かった。

施工時の試験結果を統計的にまとめると、湿潤密度、フロー値、一軸圧縮強度の変動係数はそれぞれ $0.02 \sim 0.04$ 、 $0.08 \sim 0.12$ 、 $0.25 \sim 0.31$ であった。浚渫粘土を原料土とした神戸港の事例⁴⁾ では変動係数がそれぞれ約 0.02 、 0.06 、 0.20 であり、今回の工事ではいずれの値もばらつきが大きくなっている。この原因としては、原料土がシールド泥水の脱水処理土であるため、掘削部分の土砂の性質によって凝集剤の添加量が日々変化し土性を大きく変動させていることが考えられる。

(3) 施工後のボーリング試料による品質調査

施工後1ヶ月、3ヶ月および6ヶ月経過後に、計12

表-3 混練直後の密度とコア試料の密度の比較

	湿潤密度の平均値 (g/cm ³)					
	容器	施工時の測定値		ボーリングコアの測定値		
		一軸供試体		1ヶ月	3ヶ月	6ヶ月
		7日	28日			
気泡混合処理土	1.08	1.12	1.13	1.14	1.17	1.19
発泡ビーズ混合処理土	1.09	1.05	1.05	1.14	1.13	1.18

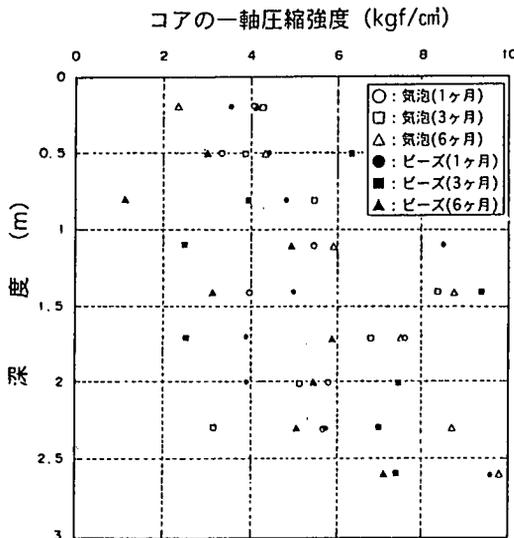


図-14 深度と一軸圧縮強さの関係

カ所の地点(図-12)でボーリングを行い、トリプルチューブまたはコアパックにより連続的に不攪乱試料を採取した。さらに、これらの試料を用いて密度及び一軸圧縮試験を実施した。

密度と深度の関係を図-13に示すが、いずれの調査地点でも平均値は管理基準値 ($\rho_1 = 1.1 \pm 0.1 \text{g/cm}^3$) を満足している。総平均値は気泡混合処理土、発泡ビーズ混合処理土ともに 1.16g/cm^3 であり、施工時の目標値である 1.10g/cm^3 を 0.06g/cm^3 上まわった。

図-14は深度と一軸圧縮強さの関係である。一軸圧縮強さは各供試体の値が管理下限値 2.0kgf/cm^2 (196kN/m^2) を大きく上まわり、総平均値は気泡混合処理土では 6.1kgf/cm^2 (598kN/m^2)、発泡ビーズ混合処理土では 5.4kgf/cm^2 (529kN/m^2) であった。

表-3は混練直後の密度とコア試料の密度の比較である。なお、表中の「容器」とあるのは混練直後の液状試料を1~2リットルの容器に入れて測定した値である。気泡混合処理土の密度は、混合直後は液状で 1.08g/cm^3 と低く、7日、28日経過した一軸圧縮試験供試体ではそれぞれ 1.12 、 1.13g/cm^3 、ボーリングコア試料では $1.14 \sim$

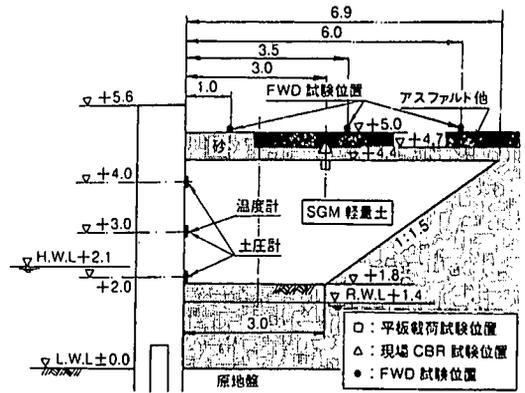


図-15 土圧の測定位置 (断面図)

1.18g/cm^3 とやや高い。同様の密度増加は、浚渫粘土を原料土とする気泡混合処理土を気中打設した場合にも観察されており、固化にともなう収縮が原因のひとつと考えられる。一方、発泡ビーズ混合処理土の密度は混練直後の状態で 1.09g/cm^3 、一軸圧縮試験供試体の材令7日、28日ですれも 1.05g/cm^3 であったが、現場から採取したボーリングコア試料では $1.14 \sim 1.18 \text{g/cm}^3$ と高くなっている。発泡ビーズ混合処理土の場合は気泡混合処理土のように消泡の影響はなくEPSビーズ自体が強度を有するので固化収縮も起こりにくいと考えられており、今回わかった密度増加の原因については今後検討していく必要がある。また、ボーリングコアにおける含水比の変化を調べた結果、経時的に変化する傾向はなく、地下水の浸透や吸い上げなどの影響はみられなかった。

以上のように、気泡混合処理土と発泡ビーズ混合処理土の密度は、いずれも施工後の値が施工時の目標値よりも 0.05g/cm^3 程度大きくなっているが、固化後の時間経過に対しては安定している。また、強度に関してはばらつきが大きいものの全体として管理値を十分に満足していることが確認された。

5. 施工中に計測された土圧

軽量混合処理土を護岸の裏込め材料として用いる大きな利点は、軽量性と自立性により土圧低減効果が期待されることである。多くの場合、地震時の土圧が設計上重要であり、常時の土圧はそれほど問題とならないが、本工事においては、施工中に矢板に作用する土圧の経時変化を測定した。

土圧の測定は、図-15に示すように、気泡混合処理土、発泡ビーズ混合処理土ともそれぞれ平面位置一点で深度方向に3カ所とした。また、土圧計の温度補正のために温度計を図に示す位置に設置した。打設中の温度は、

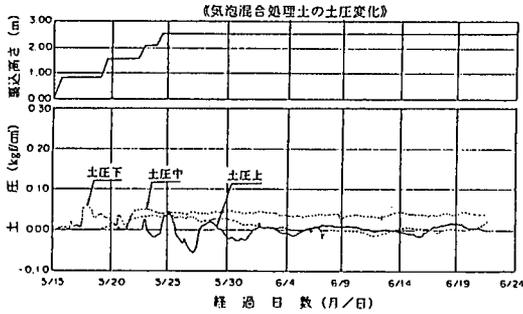


図-16(a) 土圧の経時変化 (気泡)

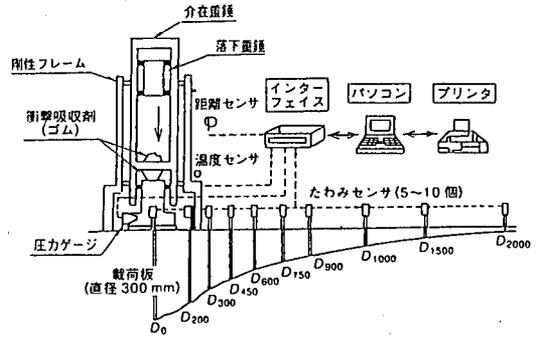


図-17 FWD試験の概要

表-4(a) 試験結果一覧 (一軸圧縮試験, FWD試験)

試験項目	軽量混合処理土	試験結果	
		範囲	平均
一軸圧縮試験 (ボーリングコアによる)	気泡	$q_u = 2.3 \sim 11.3 \text{ kgf/cm}^2$	5.7 kgf/cm^2
	発泡ビーズ	$q_u = 2.5 \sim 11.8 \text{ kgf/cm}^2$	5.6 kgf/cm^2
FWD試験	気泡	$E = 1,700 \sim 12,000 \text{ kgf/cm}^2$	3,500 kgf/cm^2
	発泡ビーズ	$E = 1,450 \sim 3,200 \text{ kgf/cm}^2$	2,200 kgf/cm^2

表-4(b) 試験結果一覧 (平板載荷試験)

試験項目	軽量混合処理土	調査地点	K30 (kgf/cm^2)	極限支持力 (kgf/cm^2)
平板載荷試験	気泡	K-1	25.6	6.4
		K-2	15.5	4.2
		K-3	20.4	5.7
	発泡ビーズ	B-1	32.0	7.6
		B-2	15.8	3.3
		B-3	14.6	4.3

表-4(c) 試験結果一覧 (現場CBR試験)

現場試験	軽量混合処理土	調査地点	軽量混合処理土上面のCBR (%)		敷砂上面のCBR (%)	
CBR試験	気泡	C-1	44.5, 32.5, 14.5 (30.5)	33.2, 27.1, 24.7 (28.3)		
		C-2	14.6, 10.0, 19.6 (14.7)	44.3, 36.1, 44.6 (41.7)		
	発泡ビーズ	C-3	28.4, 34.0, 26.8 (29.7)	48.9, 47.1, 41.3 (45.8)		
		C-4	60.6, 30.7, 34.1 (41.8)	58.8, 59.6, 61.9 (60.1)		

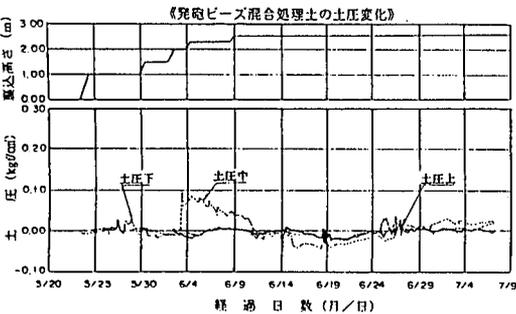


図-16(b) 土圧の経時変化 (発泡ビーズ)

25~28℃の範囲でほぼ一定であったが、これは固化材量が少なく、1回の打設層厚が50cmと薄いために、硬化に伴う温度上昇が抑制されたことによると考えられる。

図-16(a)、図-16(b)は土圧の経時変化であり、図中には土圧計設置位置における裏込め高さの推移を併せて示している。なお、一部の土圧計が負の値となっているが、これは計測誤差および温度による影響である。図のように、気泡混合処理土、発泡ビーズ混合処理土とも土圧は打設時においてやや変動がみられるが、打設終了後の固化過程では大きな変化がみられない。下部土圧計の測定値も固化後は0.05 kgf/cm^2 (4.9 kN/m^2) 以下であり、静止土圧係数は0.2以下であった。

6. 軽量混合処理土地盤における原位置試験

(1) 試験内容と試験方法

造成された軽量混合処理土地盤は空港外周道路の路床となっており、その路床としての機能を確認するため現場CBR試験、ボーリングコアによる一軸圧縮試験、平板載荷試験、FWD (フォーリングウエイトデフレクトメータ) 試験を実施し、地盤の強度、支持力、変形係

数について調査した。試験位置は図-12及び図-15に示している。

平板載荷試験は軽量混合処理土の上面で実施し、現場CBR試験は軽量混合処理土上面と敷砂上面で、FWD試験は舗装施工後に舗装上面で実施した。

FWD試験は、図-17に示すように載荷板を介して舗装面に重錘の落下による衝撃荷重を加え、これにより発生するたわみをセンサーにより測定する試験である。これらの測定値をもとに軽量混合処理土層の弾性係数

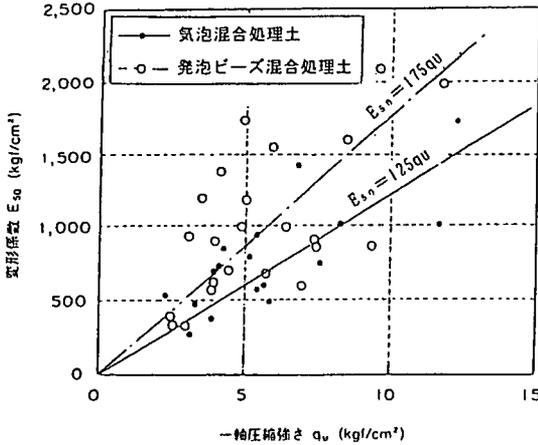


図-18 ボーリングコア試料における q_u と E_{s0} の関係

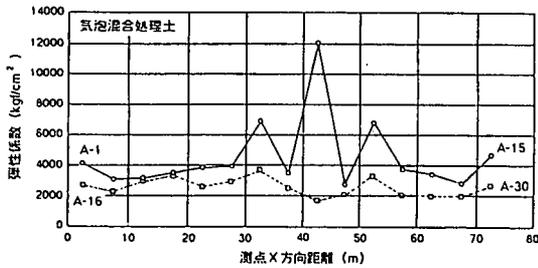


図-19(a) 各測点における弾性係数 E_{FWD} (気泡)

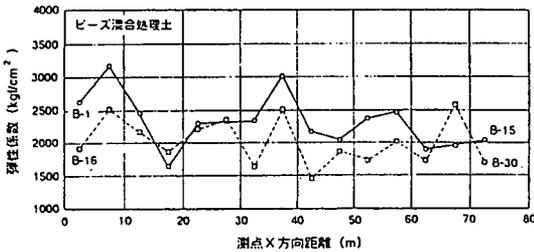


図-19(b) 各測点における弾性係数 E_{FWD} (発泡ビーズ)

を計算した。

(2) 原位置試験の結果と考察

表-4(a), 表-4(b), 表-4(c)は原位置試験結果の一覧である。コア試料における密度と一軸圧縮強さは、すでに図-13と図-14にそれぞれ示している。

図-18はボーリングコアの一軸圧縮試験により得られた応力～ひずみ関係より変形係数 E_{s0} を求め、一軸圧縮強さ q_u との関係を示したものである。両者の関係は、

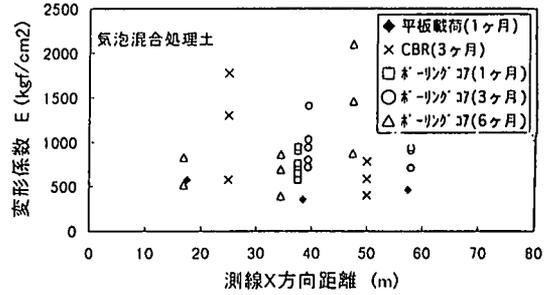


図-20(a) E_{s0} と E_{PLT} 及び E_{CBR} の関係 (気泡)

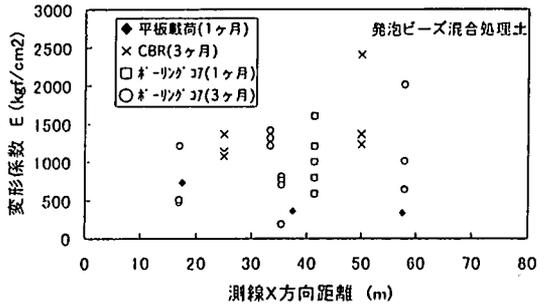


図-20(b) E_{s0} と E_{PLT} 及び E_{CBR} の関係 (発泡ビーズ)

式(1)及び式(2)のように得られた。

$$\text{気泡混合処理土} \quad E_{s0} = 125 q_u \quad (1)$$

$$\text{発泡ビーズ混合処理土} \quad E_{s0} = 175 q_u \quad (2)$$

東京湾の浚渫粘土を原料土とした軽量混合処理土では、 $E_{s0} = 100 \sim 200 q_u$ の関係があり¹⁾、今回の試験結果はほぼ同様の関係を示している。

平板載荷試験による地盤反力係数 K_{30} は、気泡混合処理土及び発泡ビーズ混合処理土ともに平均で $K_{30} = 20 \text{ kgf/cm}^3$ (196 MN/m^3) であり、道路路床として要求される $K_{30} = 5 \sim 10 \text{ kgf/cm}^3$ ($49 \sim 98 \text{ MN/m}^3$) を満足する数値を示した。また、現場 CBR 値は、気泡混合処理土及び発泡ビーズ混合処理土ともに平均でそれぞれ $\text{CBR} = 23\%$ 、 36% 程度であり、道路路床として必要な $\text{CBR} = 10\%$ 以上を満足している。

図-19(a), 図-19(b)は各測点における FWD 試験から求めた弾性係数である。図のようにばらつきはあるが、気泡混合処理土の弾性係数は $2,000 \sim 12,000 \text{ kgf/cm}^2$ ($200 \sim 1200 \text{ MN/m}^2$) の範囲に、発泡ビーズ混合処理土では $1,500 \sim 3,000 \text{ kgf/cm}^2$ ($150 \sim 300 \text{ MN/m}^2$) の範囲にあった。通常の舗装材では弾性係数は CBR 値 (%) の $50 \sim 200$ 倍とされており今回の測定値は $\text{CBR} = 10\%$ から推定される値よりも十分に大きかった。

図-20(a), 図-20(b)は、それぞれ気泡混合処理土地盤と発泡ビーズ混合処理土地盤について、ボーリングコアの一軸圧縮試験から得られた変形係数 E_{s0} と、平板載

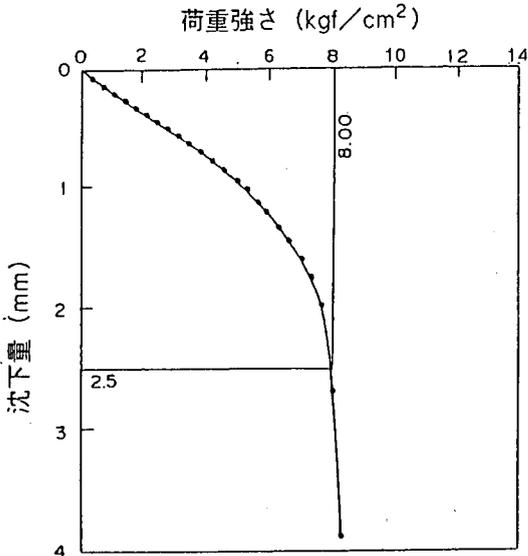


図-21 平板載荷試験における載荷応力と沈下量の関係

荷試験から求めた地盤反力係数 K_{30} から推定した変形係数 E_{PLT} 、さらに現場CBR値から推定した弾性係数 E_{CBR} との比較である。 E_{PLT} は地盤を弾性体と仮定した式(3)を用いて計算している。

$$E_{PLT} = \pi B (1 - \nu^2) \cdot K_{30} / 4 \quad (3)$$

ここに ν はポアソン比で、軽量混合処理土の三軸試験結果より0.2とした。また、 B は載荷板直径(30cm)である。

また、 E_{om} は路床材に関する経験式としてよく用いられる次式⁶⁾により算定した。

$$E_{om} = 40CBR \quad (4)$$

図より、 E_{PLT} と E_{50} を比較すると、ばらつきが大きいものの全体に E_{50} は E_{PLT} よりも大きい。対象がアスファルト舗装であるためここでは K_{30} を算定する沈下量を2.50mm(載荷板直径30cm)としており、載荷板直下の地盤内のひずみは0.8%程度に相当している。軽量混合処理土は一般に0.7~1.5%の軸圧縮ひずみで破壊するため、 K_{30} から求めた変形係数は地盤が破壊に近い状態での値であるといえる。図-21は平板載荷試験における載荷応力と沈下量の関係であるが、沈下量が1mmを越えるとはっきりと非線形を示している。このことから載荷中の地盤内のひずみが破壊ひずみに近いことが確認できる。一方、一軸圧縮試験から求めた E_{50} は、破壊前の0.1~0.3%のひずみに対応する変形係数であるので、 E_{50} と E_{PLT} の違いは、それぞれの試験法にお

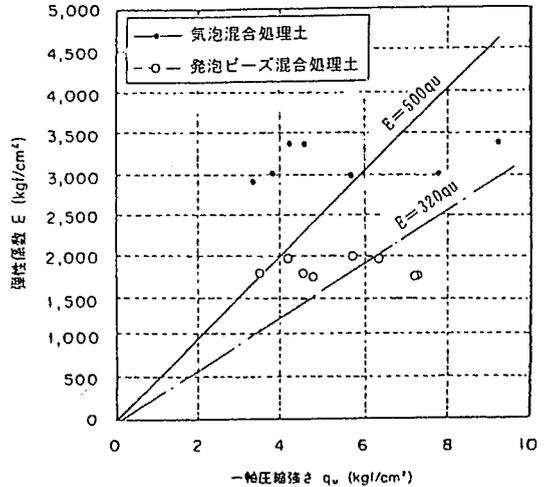


図-22 q_u とFWD試験から得られる弾性係数の関係

ける測定時のひずみレベルの違いを反映していると解釈できる。また、CBR値から式(4)で求めた変形係数は、ボーリングコアの E_{50} と平均的には一致している。

平板載荷試験から極限支持力を求めると、3.3~7.6kgf/cm²(323~745kN/m²)の範囲にあった。表層部での一軸圧縮強さは3.8~4.2kgf/cm²(372~412kN/m²)であったので、計算される支持力係数は1.7~3.8であり、通常の粘性土地盤に比べてかなり小さな支持力となった。この原因としては、軽量混合処理土のポアソン比が通常の土に比べて小さいため³⁾、載荷面直下における軽量混合処理土の応力と変形が周辺の土にあまり伝達せず、局部的にせん断破壊が起こっていることが考えられる。したがって、軽量混合処理土地盤の支持力を算定するには、このような特性を考慮して設計する必要がある。

今回の現場CBR値は10.0から60.0%の範囲にあり平均は29.1%であった。表層部の材令3ヶ月における一軸圧縮強度は1.9kgf/cm²から11.9kgf/cm²までばらつきが平均は5.37kgf/cm²であり、CBR値と一軸圧縮強度 q_u の関係は $CBR=5.4 q_u$ となっている。浚渫土を原料土とした神戸港の事例では $CBR=4 q_u$ となっており、ばらつきを考慮すると今回もほぼ同様の関係が得られているといえる。

次に、FWD試験から求められた弾性係数について検討する。図-22は、 q_u とFWD試験で得られた弾性係数 E_{FWD} との比較であるが、両者には以下のような相関が得られた。

$$\text{気泡混合処理土} \quad E_{FWD} = 500 q_u \quad (5)$$

$$\text{発泡ビーズ混合処理土 } E_{FWD} = 320 q_u \quad (6)$$

過去に軽量混合処理土地盤においてFWD試験を適用した事例はないが、非破壊試験であるFWD試験では発生するひずみが E_{50} に対応するひずみ0.1~0.3%よりも小さく、 10^{-4} ~ 10^{-3} %の微小なひずみにおける弾性係数である動弾性係数 E_d に近いと考えられる。筆者らの既往の研究によると、浚渫土を原料土とする軽量混合処理土の E_d と q_u の関係は(7)式で与えられる¹⁾。

$$E_d = (700 \sim 1500) q_u \quad (7)$$

FWD試験から求められた弾性係数による式(5)、式(6)の関係と式(7)を比べると、原位置の弾性係数は本来の動弾性係数よりも $1/3$ ~ $1/2$ の小さい値となっており、この原因としては、軽量混合処理土地盤において通常地盤よりもポアソン比が小さいこと、あるいはクラック等の発生による荷重伝達率の低下が考えられる。ただし、原位置試験と室内試験の相違を考慮すると、変形係数に関する差は許容範囲にあり、 E_{FWD} の絶対値は十分に大きいので、路床は健全であると判断できる。FWD試験は舗装を破壊することなくその荷重伝達特性を把握できるという特徴があるので、長時間経過後に再度試験を行って軽量混合処理土地盤の特性の変化を調査したいと考えている。

7. まとめ

東京国際空港の外周護岸の裏込め材として、シールド工事による発生土を原料土とした軽量混合処理土(気泡混合処理土と発泡ビーズ混合処理土)を使用した。本報告は、軽量混合処理土施工時及び施工後の一連の調査の結果から、軽量混合処理土の設計施工上の留意点についてまとめたものである。主な結論は以下のようになる。

- (1)シールド工事の発生土を原料土としたことにより、施工中の密度、フロー値、強度のばらつきは、浚渫土を原料土としたときよりも大きかった。しかし、ほぼ品質管理値の範囲内での製造と打設ができた。
- (2)施工後に地盤としての特性を調べる各種の試験を行った結果、施工後6ヶ月の時点で気泡混合処理土、発泡ビーズ混合処理土のいずれも施工時の目標密度よりも約 $0.05\text{g}/\text{cm}^3$ の密度増加があった。この原因としては、施工中の消泡あるいは固化に伴う収縮が考えられる。固化後の密度はほぼ安定している。
- (3)施工後のコアによる強度試験、原位置載荷試験の結

果、軽量混合処理土による地盤が道路の路床として妥当地盤特性を有することが確認された。

- (4)現場CBR値と一軸圧縮強さに関しては、平均的に $\text{CBR} = 5.4 q_u$ の関係が得られた。
- (5)軽量混合処理土地盤の支持力は、同様の一軸圧縮強さを有する粘土地盤よりも小さくなる傾向がある。これはポアソン比が小さいことにより局部せん断破壊が生じやすいためと考えられる。
- (6)各種試験から求められる変形係数には試験法による相違があるが、変形係数を測定しているときの地盤のひずみ量を考慮することにより、これらの相違を説明することができる。
- (7)工事終了6ヶ月後にFWD試験から求めた原位置の弾性係数は、室内試験における同一の q_u の弾性係数に対して $1/3$ ~ $1/2$ であった。弾性係数の値自体は路床として十分な大きさを有しており、軽量混合処理土は道路路床として十分な強度変形特性を有することが確認された。

参考文献

- 1) 土田孝, 横山裕司, 水上純一, 清水和也, 笠井寿太郎: 港湾における軽量混合地盤材料の用途と打設試験, 港湾技研資料, No.833, 1996.
- 2) 土田孝, 笠井寿太郎, 水上純一, 横山裕司, 植田和徳: 軽量混合土に及ぼす養生条件の影響, 港湾技研資料, No.834, 1996.
- 3) 湯怡新, 土田孝, 竹内大輔, 鏡田昌孝, 西田登: 軽量混合処理土の三軸試験結果と考察, 港湾技研資料, No.845, 1996.
- 4) 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/IV-40, pp.35-52, 1998.
- 5) 宮島正悟, 安達昭宏, 深沢健, 岸田隆夫, 土田孝: 軽量気泡混合土の力学特性の経時変化, 土木学会第53回年次学術講演会講演概要集, pp.666-667, 1998.
- 6) 高木保: 鉄道トンネルの設計と施工—滑走路直下をシールドで貫く—, 土木技術, 第53巻, 10号, pp.76-84, 1998.
- 7) 土田孝, 佐藤正一, 岸田隆夫, 八木英樹, 平野孝行: 分割法による地震時土圧の算定と軽量裏込め材料への適用, 第31回地盤工学研究発表会講演集, pp.1083-1084, 1996.
- 8) 土田孝, 輪湖建雄, 福原哲夫: 軽量固化体による地震時土圧低減効果と土圧分布について, 第32回地盤工学研究発表会講演集, pp.1149-1150, 1997.
- 9) 地盤工学会: 地盤調査法, 第8編載荷試験, 第4章現場CBR試験, pp.362-368, 1995.

(1999.3.12 受付)

USE OF LIGHT-WEIGHT TREATED SOILS MADE OF WASTE SOIL IN AIRPORT EXTENTION PROJECT

Takashi TSUCHIDA, Haruo FUJISAKI, Masaharu MAKIBUCHI,
Hiroshi SHINSHA, Yuji NAGASAKA and Kaneo HIKOSAKA

This report is a case history of the construction work in which the artificial light-weight soils were used for the back-filling of the revetment in Tokyo International Airport. The light-weight soils were made by mixing the waste clay slurry, which was caused by the construction of shield tunnel in the airport, with cement, air foam and EPS beads. According to the data taken in the construction, the properties of the soils satisfied the range for the quality control in spite of the change of the properties of waste soil. To investigate the ground properties of the light-weight soils, the core sampling and the laboratory tests, in-situ plate loading test, CBR test, and Falling Weight Deflectometer Test were carried out after 2-6 months after the construction, and the comparison and discussions are made.