

文章编号: 1674-9057(2018)01-0106-06

doi:10.3969/j.issn.1674-9057.2018.01.015

填埋固化污泥的物质组成及物理力学性质

——以深圳福永污泥填埋场为例

冉孟胶, 林署炯, 陈剑尚, 张澄博

(中山大学 地球科学与工程学院, 广州 510275)

摘要: 对深圳福永污泥填埋场中固化污泥的物质组成和物理力学性质进行研究, 用以评估其作为机场地基土的适宜性。研究区填埋固化污泥主要矿物成分为石英、粘土矿物以及少量的水泥水化物; 主量元素有 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 、 Fe_2O_3 等, 重金属 Ni 含量超过国家城镇污水处理厂污染物排放标准; 污泥中还含有醇、酚、苯类衍生物、脂肪族烃等复杂有机化合物。物理力学性质分析结果表明: 研究区填埋固化污泥具有高孔隙比、高含水量、高液塑限、高压缩性、高有机质含量、低密度、低渗透性的特征, 属于高有机质高液限粉土, 基本性质与海积淤泥软土相似, 但有机质含量达 13.77%, 工程性质较普通软土更差, 不利于地基稳定。

关键词: 填埋固化污泥; 污泥地基; 物质组成; 物理力学性质

中图分类号: TU411.2; TU411.3

文献标志码: A

1 工程概况

福永污泥填埋场位于深圳市宝安区, 现作为机场备用场地, 前期填埋了大量固化污泥及少量建筑垃圾、塘底淤泥等, 填埋场占地面积 0.65 km^2 , 厚度不均(分布于 $0.90 \sim 6.70 \text{ m}$), 平均厚度为 3.15 m , 场地复杂程度高。现因机场扩建, 计划利用部分填埋固化污泥作为地基, 要求地基承载力特征值达到 $100 \sim 150 \text{ kPa}$ 。目前该场地建设遇到的主要问题是填埋的固化污泥承载力不够、散发臭气, 对周围水体有一定污染。研究区固化污泥成分复杂, 较一般填土地基更为特殊, 但目前对其具体特征指标还不清楚, 因此有必要对该填埋场固化污泥的基本理化性质进行详细研究。

前人对固化污泥的性质研究主要偏重于不同固化剂对污泥的固化效果, 其中以水泥为基础固化污泥并养护 $7 \sim 28 \text{ d}$ 后的研究较多。研究结果表明, 基于水泥固化稳定化技术能有效稳定污泥中

污染物, 提高污泥工程性质, 具体提高程度与固化水平有关。一般经养护 7 或者 28 天后的固化污泥主要晶体成分为石英及水泥水化物钙矾石、水合硅酸钙以及多金属氢氧化物水合物, 化学成分以硅、铝、铁、钙的氧化物为主^[1-3]。也有学者研究了污泥长期暴露于自然环境中的性质变化情况, 如 Fitch 等^[4]对比了养护 28 d 的水泥固化污泥与暴露于环境 10 a 的固化污泥的性质, 固化污泥长时间暴露于自然环境中, 晶体成分由常见的水泥水化物变成了碳酸钙和复合金属氢氧化物及大量的非定型物质, 且污泥结构更加密实。朱英等^[5]研究了填埋时间对脱水污泥的影响, 随着填埋时间的增加, 污泥大尺寸颗粒所占比重增加, 容重、密度、孔隙度都有不同程度的增加, 有机质含量减少, 微生物活性增加。但针对固化污泥工程应用的研究资料较少, 对污泥作地基应用的报道更少, 其中 Disfania 和 Arulrajaha 等^[6-7]研究了污泥路基填土的性质, 污泥经过一定处理基本能达

收稿日期: 2016-07-11

基金项目: 广东省自然科学基金项目 (S2013010012521)

作者简介: 冉孟胶 (1992—), 女, 硕士, 岩土工程专业, Mengjiao913@126.com。

通讯作者: 张澄博, 博士, 副教授, eeszc@mail.sysu.edu.cn。

引文格式: 冉孟胶, 林署炯, 陈剑尚, 等. 填埋固化污泥的物质组成及物理力学性质——以深圳福永污泥填埋场为例 [J]. 桂林理工大学学报, 2018, 38 (1): 106-111.

到路基要求，但长期稳定性还有待研究。本研究选取了深圳机场扩建场地填埋一年的固化污泥为研究对象，对其物质组成和基本物理力学性质进行研究，为后期地基处理提供科学依据。

2 材料与方法

采样深度距地表 80 ~ 100 cm，编号为 1 - 1、1 - 2。样品呈灰黑色，并伴有恶臭刺鼻气味。采集的样品装入直径 10 cm 的圆柱状铝盒中密封保存于阴凉处，带回实验室进行分析。

样品分为 3 部分：部分样品在 60 ℃ 下烘干至恒重,将烘干样品进行充分研磨，过 200 目(0.074 mm)筛，用于物质组成分析。一部分样品液氮冷冻后进行冷冻真空干燥处理，用于扫描电镜微观结构分析。样品经相应的预处理后，用 X 射线荧光光谱 (ZSX primus)测定主成分，元素分析仪 (Vario EL)测总有机质碳和总氮，用总有机碳乘以 1.724 估算有机质含量。用 X 射线衍射仪 (Empyrean) 结合傅里叶红外光谱 (Nicolet 6700)、扫描电镜 (SIGMATM)和 X 射线能谱 (X - MAX020)分析晶体与非晶体成分，利用电感耦合等离子体质谱仪 (X Series II)定量测定微量元素。另外一部分原状样品用于基本物理力学性质分析，包括密度、比重、天然含水量、渗透系数、液塑限、压缩系数、内摩擦角、粘聚力等。

3 结果与分析

3.1 成分和微观结构

3.1.1 化学成分 从表 1 可知，填埋固化污泥化学成分以 SiO₂、Al₂O₃、CaO、Fe₂O₃ 等为主，这与

普通土体的组成一致。此外，该填埋固化污泥在 550 ℃ 条件下烧失量达 25%，表明其有机质和挥发盐含量高。表 2 为微量元素分析结果，参考《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)可知，研究区固化污泥 Ni 含量超标，Cu 接近标准限度，其余重金属含量都在国标限度范围内，这可能与深圳的主要经济发展产业有关。深圳的主要产业有通信、钟表、电子产品行业，这些都是镍、铜的主要应用领域，所以导致深圳污泥中铜、镍较其他元素含量高。

图 1 是固化污泥的 FITR 红外谱图，从谱图可知其官能团复杂，3 408 cm⁻¹处宽而强的吸收峰表示羟基化合物缔合形成的氢键，主要指示水、醇、酚、有机酸类化合物的存在。此外 2 929 cm⁻¹处的 C—H 亚甲基不对称伸缩振动和 1 423 cm⁻¹处亚甲基 C—H 对称伸缩振动跟标准谱图对比指示含有脂肪烃类化合物。2 000 ~ 1 400 cm⁻¹之间形成的强度不等的吸收峰指示存在芳香烃类化合物及苯的衍生物，这些都是常见的挥发性有机物，也说明烧失量中大部分是挥发性有机物。此外，谱图中吸收峰最强的峰是硅氧化学键的典型特征峰，主要表示二氧化硅及硅酸盐类粘土矿物。

3.1.2 矿物成分及微结构 利用 XRD 分析了固化污泥土中的晶体矿物成分。由谱图自动配比结果可知(图 2)，匹配度最高的矿物为石英；其次还有碳酸钙、钙矾石，这是常见的水泥水化物，这些水化物的存在可以增加污泥的强度，同时也能稳定重金属等有毒有害成分。对比粘土矿物的特征峰可知，谱图上伊利石的 3 个特征峰都存在，高岭石的特征峰有两个，没有发现蒙脱石的特征峰。

表 1 主要成分分析结果
Table 1 Results of principal components analysis

样品编号	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	CaO	MnO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	LOI
1 - 1	30.1	12.33	0.67	1.98	1.42	19.15	0.18	5.07	0.44	2.08	24.96
1 - 2	30.46	11.95	0.68	2.04	1.38	19.41	0.19	5.04	0.42	2.13	24.86

表 2 微量元素分析结果
Table 2 Results of trace elements analysis

样品编号	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb	U	Th
1 - 1	477.6	319.5	1 025	931.2	38.09	3.918	84.65	10.32	19.1
1 - 2	466.9	312.5	1 036	949	37.85	4.018	84.08	10.28	19.39
污泥控制标准 (pH≥6.5) (GB 18918—2002)	1 000	200	1 500	3 000	75	20	1 000	*	*

注：* 表示无标准。

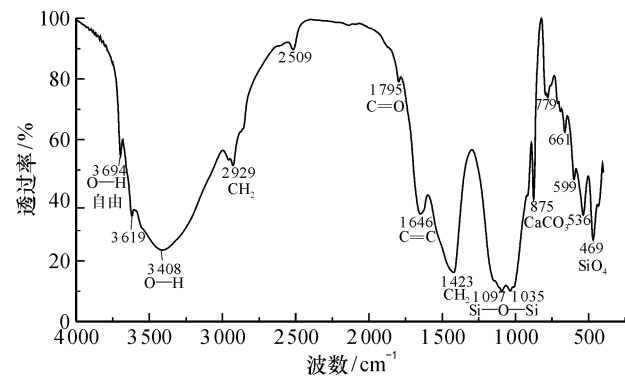


图 1 填埋固化污泥的 FTIR 谱图

Fig. 1 FTIR image of landfilled solidified sludge

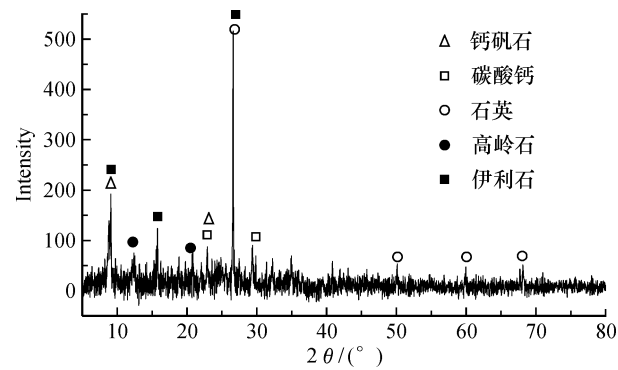


图 2 填埋固化污泥的 XRD 谱图

Fig. 2 XRD image of landfilled solidified sludge

综上，固化污泥中的晶体矿物有石英、伊利石及水泥水化物钙矾石、碳酸钙。谱线明显峰较少，存在很多细小的干扰峰，说明非晶质成分较多。

图 3 为不同放大倍数的冷冻干燥填埋固化污泥扫描电镜图。结合能谱可知，固化污泥中存在无定型水合硅酸钙、针状钙矾石，这是水泥常见水合物，这些水泥颗粒及水合物分布于污泥颗粒周围或与污泥颗粒相互穿插，作为固化污泥骨架，具有一定强度。其次固化污泥中还含有叠聚在一起的片状粘土矿物，粘土矿物和水泥颗粒凝结在一起，形成叠聚体，矿物表面上还可见有机絮凝物质。水泥水合物及水泥混凝土以粉土粒径存在，有机组分呈无定型附着于其他矿物颗粒表面。同时，也可观察到大量以 $5\text{ }\mu\text{m}$ 左右甚至更小的微孔隙的存在，微孔隙多代表比表面积大、吸附点多，致使固化污泥结合水含量高。总体上，固化污泥颗粒形态各异，孔隙尺寸大到几十微米，小到几十纳米，非均质性强。

3.2 填埋固化污泥物理力学性质

填埋固化污泥的基本物理性质如表 3 所示。结果显示，填埋固化污泥呈现含水量高、液塑限高、塑性指数高、有机质含量高、密度低、相对密

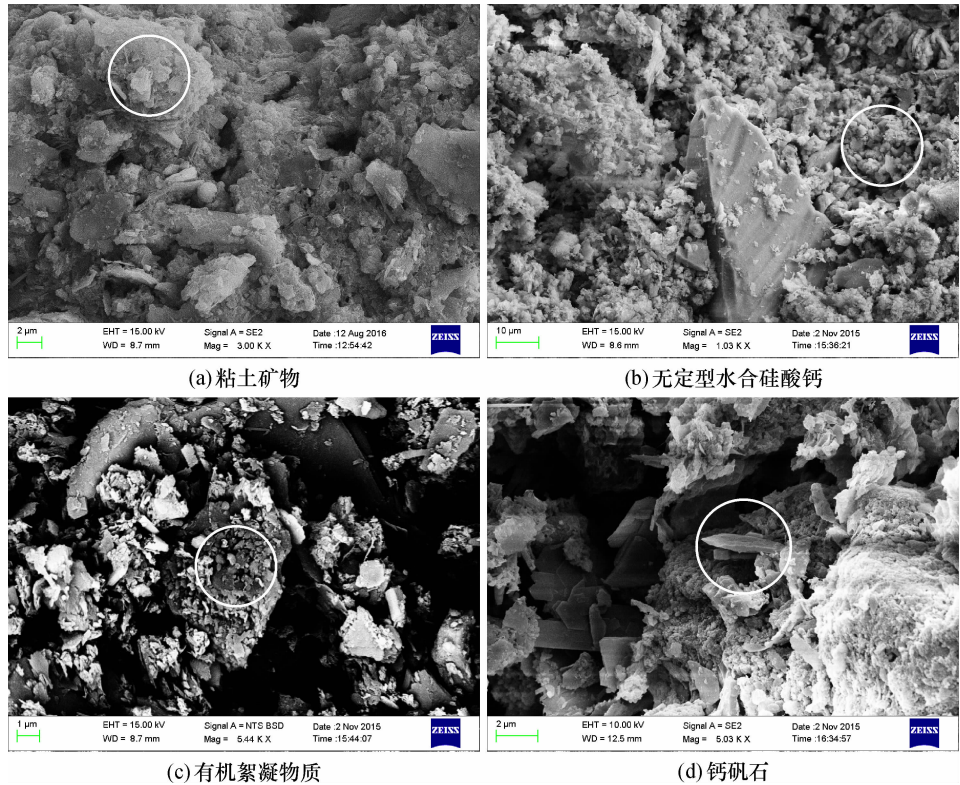


图 3 填埋固化污泥扫描电镜图

Fig. 3 Scanning electron microscope of landfilled solidified sludge

表 3 填埋固化污泥基本物理性质

Table 3 Physical property of landfilled solidified sludge											
含水量/%	天然密度/ (g·cm ⁻³)	相对密度/ (g·cm ⁻³)	孔隙比 <i>e</i>	<i>w</i> (有机 质)/%	<i>w</i> (粉土)/% 0.005~0.075 mm	<i>w</i> (粘粒)/% <0.005 mm	液限 /%	塑限 /%	塑性 指数	液性 指数	渗透系数/ (10 ⁻⁷ cm·s ⁻¹)
126	1.27	2.295	3.07	13.77	60.99	30.08	110.8	83	27.8	1.44	2.71

度小、渗透性小等特点。密度、相对密度都较低，与污泥中有机质含量高有关，有机质比一般土颗粒轻，所占比例较大情况下导致研究区固化污泥整体密度小。研究区固化污泥渗透性在 10⁻⁷ cm/s 数量级范围内，渗透性极低，不利于排水固结。这种低渗透材料能有效地封闭其中污染物，降低重金属和有机污染物的淋滤释放。但由于这种固化污泥材料受自然环境影响较大，如朱伟等^[8]研究了生化作用对固化污泥渗透性的影响，结果表明酸性环境会增加固化污泥渗透性，而微生物活动则会降低透水性，所以填埋固化污泥土长期稳定性具有不确定性，有必要作进一步研究，观测其长期稳定性。

此外，高液塑限、高塑性指数表明该填埋固化污泥可塑性强，液限大于 1，呈流塑状态，但实际样品呈松散土状，更像是软塑状，也表明描述正常土稠度界限指标不能完全表征固化污泥这种特殊材料。粒度分析显示，固化污泥细粒成分占 91% (< 0.075 mm)，其中粉土 (0.005 ~ 0.075 mm) 占 61%，粘粒 (<0.005 mm) 占 30%，结合前述扫描电镜图像可知，粉土部分主要为水泥混凝土，粘粒部分以有机物和粘土矿物为主。同时，固化污泥有机质含量达 13.77%，按照细粒土塑性图分类，研究区填埋固化污泥属于高有机质高液限粉土，这也与前人研究结果污泥主要以有机粉土颗粒存在相吻合^[7]，但其塑性指数大于 10，又属于粘土。塑性指数主要反映弱结合水含量，结合前文分析研究区填埋固化污泥塑性指数偏高的原因如下：(1) 固化污泥粉粒部分主要是水泥与污泥混凝颗粒，其中水泥水化物水合硅酸钙比表面积大，具有较强的吸附能力，所以粉粒部分也含有大量的吸附结合水。(2) 污泥粘粒部分主要是粘土矿物和有机质，其中粘土矿物含有较高结合水量。资料^[9]表明，土体中 1% 的腐殖质，其所起的作用相当于 1.5% 其他矿物成分形成的粘粒。因此高有机质含量，则相当于增加了试样中粘粒含量，也因此增加了结合水量，而有机物本身也可与水结合

形成结构水。(3) 固化污泥微孔隙比较发育，增加了水的附着点，也是结合水含量高的原因。综上，研究区填埋固化污泥较正常粉土结合水含量更高，粘性更高，塑性指数更高。而土粒间结合水的多少及强弱直接影响土的性质，如粘性、塑性、渗透性等。故反映出的表观现象是含水量高、机械脱水困难、液塑限高、塑性指数大、渗透性小等特点，这也从微观上解释了研究区固化污泥表现出的物理力学性质。

表 4 和图 4、图 5 显示了研究区填埋固化污泥的基本力学指标，其中，固化污泥压缩系数 a_{1-2} 大于 0.5 MPa⁻¹，按土工分类属于高压缩性土，根据

表 4 填埋固化污泥基本力学指标

Table 4 Mechanical property of landfilled solidified sludge				
一维固结试验			直剪试验(快剪)	
压缩系数 a_{1-2}/MPa^{-1}	压缩模量 E/MPa	压缩 指数	粘聚力 c/kPa	内摩擦 角 $\varphi/(^\circ)$
3.073	1.325	1.021	30	5

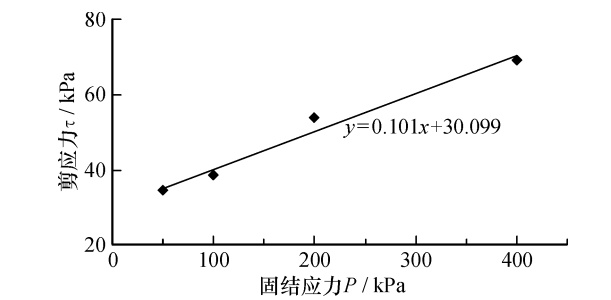


图 4 填埋固化污泥强度曲线(快剪)
Fig. 4 Strength curve of landfilled solidified sludge(fast shear test)

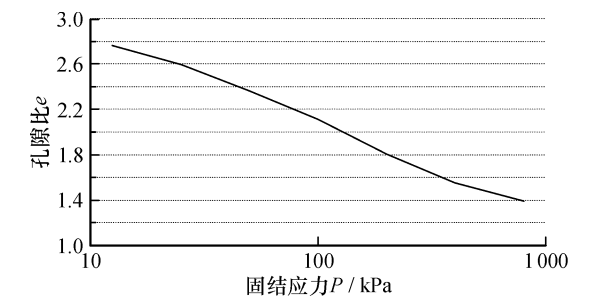


图 5 填埋固化污泥 $e - \log P$ 曲线
Fig. 5 Curve $e - \log P$ of landfilled solidified sludge

$e - \log P$ 曲线可知, 研究区固化污泥属于欠固结土。直剪试验指示其强度指标粘聚力为 30 kPa, 内摩擦角 5° , 内摩擦角较小, 则表明土颗粒间咬合力小, 密实度不高。然而该固化污泥有一定的粘聚力, 而粘聚力主要部分是由土颗粒间水膜受到相邻土粒间分子引力而形成的, 可推测固化污泥颗粒间结合水膜较厚, 颗粒间由结合水膜连接的胶结作用较明显, 颗粒间易于错动形成润滑摩擦, 所以表现为粘聚力较大而内摩擦角小。前文微结构分析表明, 固化污泥中有大量微孔隙, 也能提供较大的毛细粘聚力。此外, 固化污泥还含有一定的固化粘聚力。

参考骆以道等^[10]统计的深圳西部滨海海积软土力学性质($a_{1-2} = 0.44 \sim 4.31 \text{ MPa}^{-1}$; $E = 0.83 \sim 4.41 \text{ MPa}$; $\varphi = 0^\circ \sim 8.3^\circ$; $c = 1 \sim 48 \text{ kPa}$), 研究区固化污泥除有机质含量较高外, 其余工程力学指标与深圳西部滨海海积软土一致。

4 讨论

依据《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011), 填埋固化污泥天然含水率大于液限, 并且福永污泥填埋场中填埋的固化污泥在地下水位以下, 饱和度较高, 可近似视为饱和土, 天然孔隙比大于 1.5, 塑性指数大于 17, 压缩系数 a_{1-2} 大于 0.5 MPa^{-1} , 按土的工程分类属于淤泥, 结合前人研究对比发现, 研究区填埋一年的固化污泥性质与海积淤泥软土较一致, 即具有含水量高、有机质含量高、高液塑限、高塑性指数、低渗透性、欠固结等特征, 工程性质差^[11-13]。研究区固化污泥有机质含量达 13%, 相比于当地的海积软土偏高, 故该填埋固化污泥工程性质较一般海积软土更差。因此将研究区填埋固化污泥用作地基土时, 在荷载作用下后期可引起较大压缩沉降, 因有机质降解引起的不均匀沉降不可忽略, 同时需考虑地基长期稳定性。

对福永污泥填埋场中填埋了一年的固化污泥的物质成分分析表明, 填埋固化污泥除含有普通土体成分外, 还含有水泥水化物, 如晶体钙矾石、碳酸钙、无定型水合硅酸钙等, 且有机质含量和重金属含量较普通土高, 其中 Ni 含量超过国家《城镇污水处理厂污染物排放标准》, 有机部分较正常土成分更复杂, 大多为外源有机化合物如苯

及其衍生物、芳香烃类、脂肪烃类等, 而天然土中有机质主要为纤维素和腐殖质^[14]。因此填埋固化污泥较一般土体成分更复杂, 有毒有害物质更多, 在用作地基时, 应考虑其对周围环境的影响。

综上, 将福永污泥填埋场中固化污泥作为深圳机场扩建地基前, 应采取地基处理措施, 提高污泥地基工程性质以满足机场建筑地基要求。同时, 须采取一定方法稳定其中有毒有害物质, 防止污染物淋滤扩散, 污染周围环境。因研究区填埋固化污泥土性质与海积软土相似, 可借鉴沿海地区软基处理方法(如堆载预压法)。但由于填污泥对地下水、地表水环境影响较大, 可考虑采取隔水措施, 阻断该区域与场地其他区域的水力联系。

5 结论

研究区填埋一年固化污泥的物质组成及物理力学性质总结如下:

(1) 固化污泥化学成分以 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 、 Fe_2O_3 等为主, 微量元素有 Cr、Cu、Zn、Ni、Cd、Pb、U、Th, 其中 Ni 含量超过城镇污水处理厂污染物排放标准, Cu 接近排放标准, 其余微量元素在国标范围内。有机组分成分复杂, 不乏酚、醇、脂肪族类、苯类衍生物等复杂有机化合物。

(2) 填埋固化污泥主要矿物有石英、粘土矿物及水泥水化物针状钙矾石、无定型水合硅酸钙、晶体碳酸钙。

(3) 物理力学性质显示, 含水量 126%, 初始孔隙比 3.07, 塑性指数 27.8, 有机质含量 13.77%, 密度 1.27 g/cm^3 , 渗透系数 $2.71 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ 。按工程分类研究区填埋固化污泥属于高有机、高液限粉土, 具有高压缩性、欠固结等特征。

(4) 研究区填埋固化污泥性质和海积淤泥软土相似, 但其有机含量比一般海积淤泥软土高, 成分更复杂, 其工程性质更差。所以在将该填埋固化污泥作地基时, 可借鉴软基处理技术加固地基, 并结合环境污染治理方法, 稳定污染物, 提高污泥地基工程性质, 以满足机场地基建设要求。

参考文献:

- [1] Malliou O, Katsioti M, Georgiadis A, et al. Properties of stabilized/solidified admixtures of cement and sewage sludge[J]. Cement & Concrete Composites, 2007, 29(1): 55–61.
- [2] Asavapisit S, Naksrichum S, Harnwajanawong N. Strength,

- leachability and microstructure characteristics of cement-based solidified plating sludge [J]. *Cement and Concrete Research*, 2005, 35 (6): 1042 – 1049.
- [3] Phenrat T, Marhaba T F, Rachakornkij M. A SEM and X-ray study for investigation of solidified/stabilized arsenic – iron hydroxide sludge [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2005, B118 (1 – 3): 185 – 195.
- [4] Fitch J R, Cheeseman C R. Characterisation of environmentally exposed cement-based stabilised/solidified industrial waste [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2003, A101 (3): 239 – 255.
- [5] 朱英, 赵由才, 李鸿江, 等. 污泥填埋稳定化过程中的物理、化学性状变化 [J]. *生态环境学报*, 2009, 18 (4): 1207 – 1212.
- [6] Disfani M M, Arulrajah A, Suthagaran V, et al. Long-term settlement prediction for wastewater biosolids in road embankments [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2013, 77 (1): 69 – 77.
- [7] Arulrajah A, Disfani M M, Suthagaran V, et al. Select chemical and engineering properties of wastewater biosolids [J]. *Waste Management*, 2011, 31 (12): 2522 – 2526.
- [8] 朱伟, 李磊, 林城. 生物化学作用对污泥固化体渗透性的影响 [J]. *岩土力学*, 2006, 27 (6): 933 – 938.
- [9] 唐大雄, 刘佑荣, 张文殊, 等. 工程岩土学 [M]. 2 版. 北京: 地质出版社, 1999: 26 – 27.
- [10] 骆以道, 杨光华, 张玉成, 等. 深圳西部滨海海积软土工程特性及统计分析 [J]. *土木工程与管理学报*, 2012, 29 (2): 79 – 86.
- [11] 李雪刚. 杭州海相软土的固化及其理论研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [12] Sakr M A, Shahin M, Metwally Y M. Utilization of lime for stabilizing soft clay soil of high organic content [J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2009, 27 (1): 105 – 113.
- [13] 张先伟, 王常明, 李忠生, 等. 不同地区结构性软土基本性质的对比研究 [J]. *工程勘察*, 2010(5): 6 – 10, 93.
- [14] 高国瑞. 近代土质学 [M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2013: 53 – 54.

Composition and physico-mechanical property of landfilled solidified sludge: a case study of sludge landfill site in Fuyong, Shenzhen

RAN Meng-jiao, LIN Shu-jiong, CHEN Jian-shang, ZHANG Cheng-bo

(School of Earth Science and Geological Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Composition and physico-mechanical property of landfilled solidified sludge in sludge landfill site in Fuyong of Shenzhen were investigated to assess the suitability as structural fill material in airport foundation. Results of composition implied that major minerals of landfilled solidified sludge in study area are quartz, clay minerals and cement hydrate. The main chemical elements are oxygen, silicon, aluminum, calcium and iron et al. In addition, the trace element Ni is out of the limit of national standard. And solidified sludge also contains alcohol, phenol, benzene derivatives, aliphatic compounds and other complex organic compounds. Results of physico-mechanical property implied that landfilled solidified sludge belongs to high organic matter, with liquid limit silt, and demonstrates behavior similar to marine silt soft soil with high organic matter content, void ratio, liquid limit and plastic limit, compressibility characteristics, low density, low permeability, especially a higher organic matter content of 13.77%. In conclusion, engineering property of landfilled solidified sludge in study area is worse than common soft soil, not good stability for the foundation.

Key words: landfilled solidified sludge; sludge foundation; composition; physico-mechanical property