

深圳福永填埋固化污泥土的工程性质研究*

林署炯, 陈剑尚, 冉孟胶, 张澄博
(中山大学地球科学与地质工程学院, 广东 广州 510275)

摘要: 深圳福永污泥填埋场位于深圳国际机场拟建 T4 航站楼扩建区中部, 填埋场内堆积了大量的固化污泥土, 是机场地基处理遇到的难题。为了查清固化污泥土的岩土工程性质, 对填埋污泥进行了物质成分分析、微观结构观察、室内外力学试验等。结果表明: 固化污泥土中含片状的粘土矿物颗粒、未定型的水化硅酸钙 (CSH)、针状的钙矾石以及结构松散的有机絮凝体; 土颗粒间孔隙多, 孔隙较大 ($1 \sim 6 \mu\text{m}$), 存在大量的微孔隙; 固化污泥土具有低密度、低土粒密度、高含水率、高孔隙比、高液塑限等特点; 土体十字板抗剪强度值为 $13.8 \sim 23.7 \text{ kPa}$, 强度随固结应力的增加而大幅增加; 地基承载力特征值为 78.9 kPa , 变形模量为 4.1 MPa , 重塑后压缩系数 a_{1-2} 为 3.073 MPa^{-1} 。

关键词: 填埋固化污泥土; 机场地基; 岩土工程性质; 微观结构观察

中图分类号: TU443 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2017) 03-0093-07

Geotechnical engineering properties of the solidified sludge soil landfilled in Fuyong Shenzhen, China

LIN Shujiong, CHEN Jianshang, RAN Mengjiao, ZHANG Chengbo

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

Abstract: The Fuyong sludge landfill site is located in the middle of the extension area of Shenzhen International Airport, where it is going to build the T4 terminal. There is a great amount of solidified sludge soil landfilled in this site, which is a difficult problem for airport foundation improvement. In order to find out the geotechnical engineering properties of the solidified sludge soil, experiments including component analysis, microstructure observation, laboratory soil tests and *in-situ* tests were performed in this study. The results showed that the solidified sludge soil contained flake clay mineral particles, unshaped hydrated calcium silicate (CSH), needle like ettringite and loose structure organic matters; there were a lot of voids between the soil particles including macrovoid ($1 \sim 6 \mu\text{m}$) and microvoid; the solidified sludge soil had characters of low density, low soil particle density, high water content, high void ratio, high liquid limit and high plastic limit; the vane shear strength of the soil was $13.8 \sim 23.7 \text{ kPa}$ and its strength increased greatly with the increase of the consolidation stress; the characteristic value of foundation bearing capacity was 78.9 kPa and the deformation modulus was 4.1 MPa , but the compression coefficient of the remolded soil was 3.073 MPa^{-1} .

Key words: solidified sludge soil; airport foundation; geotechnical engineering properties; microstructure observation

* 收稿日期: 2016-12-02

基金项目: 广东省自然科学基金 (S2013010012521)

作者简介: 林署炯 (1991年生), 男; 研究方向: 岩土工程; E-mail: 870657385@qq.com

通信作者: 张澄博 (1970年生), 男; 研究方向: 岩土工程; E-mail: eeszb@mail.sysu.edu.cn

污水污泥是城市污水处理厂进行污水处理后的固体沉淀物,是一种成分复杂、有害物质高度浓缩的污染物。污泥的典型特征为含有大量的有机质,据郭广慧等^[1]的研究表明,我国城市污泥中有机质的平均含量为 28%,最高可达 45%。受我国国情影响,近期内对污水污泥的处置仍将以卫生填埋为主^[2-4],但污水污泥工程性质极差,污泥填埋前需进行固化处理。目前污泥固化处理多以水泥为主要固化剂,处理后污泥含水量下降,有机质含量下降,强度提高,外观表现似粘土。本文将这种固化处理后的污泥称为固化污泥土。

以往对污泥固化的研究主要以填埋处置为目的,一般填埋后场地不再利用,因此只需达到填埋要求的强度即可(抗剪强度 ≥ 25 kPa,无侧限抗压强度 ≥ 50 kPa^[5])。如今,随着大城市污泥产量增大,填埋场地有限,对固化污泥填埋后场地的再利用逐渐受到了重视。本文所研究的深圳福永污泥填埋场就是一个先例。福永污泥填埋场位于深圳宝安机场西北侧,前期填埋了大量的固化污泥土,如今污泥填埋场将作为机场扩建场地,史无前例地以固化污泥土作为地基。但固化污泥土属人造高有机质土,性质独特甚至不明,传统地基处理方法的有效性值得研究,地基应如何进行改良处理成为工程师头疼的问题。

现有对固化污泥土工程性质的研究还较少。曹永华等^[6]通过室内试验,向污泥中添加不同比例的石灰、土和粉煤灰,研究了固化污泥的工程性质及微观结构特征,发现固化后污泥的密实度提高,强度提高,渗透性也有很大提高。李磊等^[7]研究发现,即使水泥添加量达到 30%,固化污泥的压

缩指数也高达 0.71,是一种高压缩性的土。固化污泥土在填埋压实过程中,其性质也会发生相应的变化。薛飞等^[8]研究了固化污泥在压实过程中微观结构的变化特性,发现击实后絮状体相互搭接、黏结,颗粒逐渐团粒化,生成较大的块状体,孔隙被逐步压实填充,使得孔隙体积减小,密实性增加、强度增强。易进翔等研究也发现,随着压缩的进行,固化污泥的强度增加,压缩性变小^[9]。另一方面,李磊等^[10]和易进翔等^[11]的研究发现,微生物能够将固化污泥土中的有机物降解,同时产生有机酸和无机酸,影响其强度和变形等特性。

固化污泥土性质复杂,现有对填埋后固化污泥土工程性质的研究还不够详细,未能揭示固化污泥土作为地基土的基本特性。本文以深圳福永填埋场的固化污泥土为研究对象,通过成分分析、微观结构观察、室内土工试验和室外原位试验等多种方法,对填埋后固化污泥土的基本岩土工程性质进行了详细的研究。

1 工程概况

深圳福永污泥填埋场位于深圳市宝安区福永,珠江口伶仃洋东侧,该区属亚热带海洋性季风气候,年平均气温 22.5℃,年平均降雨量为 1 966.3 mm。污泥填埋场原本主要为鱼塘,底部为富含有机质的塘底淤泥和海相沉积的淤泥质软土。为满足城市污水厂污泥的处置需要,填埋了大量经水泥、石灰等固化稳定化处理后的固化污泥土。整个场地填埋面积 0.65 km²,厚度 0.90~6.70 m,平均层厚为 3.15 m,填埋范围如图 1 所示。因机场扩建,污泥填埋场地亦作为建设用地,场区要求处理后地

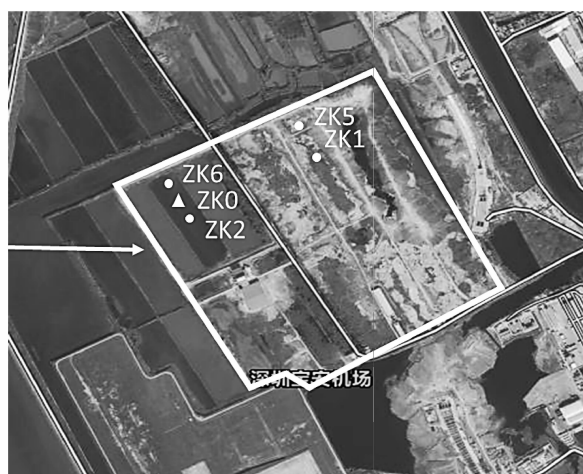
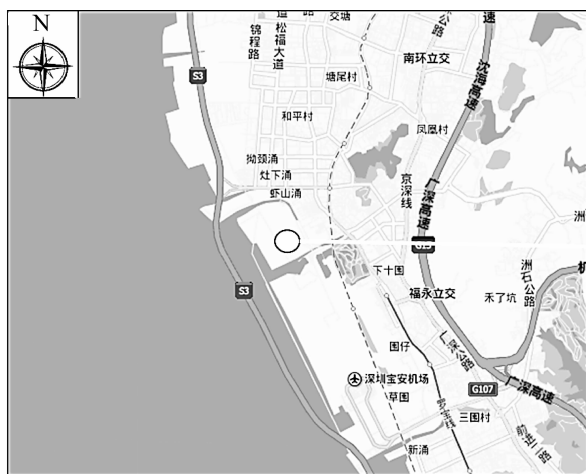


图 1 福永污泥填埋场位置图

Fig. 1 Location of Fuyong sludge landfill site

基承载力特征值达到 100 ~ 150 kPa。在进行地基处理前，有必要对场地中的固化污泥土进行详细的岩土工程性质研究。

2 试验方法

2.1 室内土工试验

通过野外钻孔采样，对固化污泥土进行天然密度、土粒密度、含水量、液塑限、直剪、压缩等试验。采样点位于钻孔 ZK0 处（如图 1 所示），此处固化污泥土埋龄期约 2 a，采样深度 2 ~ 3 m。由于固化污泥土粘性大，附着力强，使用钻孔取样对土体扰动较大，因此室内试验土样基本属于重塑土。试验方法参照国家标准《土工试验方法标准》（GB/T 50123—1999）。其中天然密度试验采用环刀法。土粒密度试验采用比重瓶法，使用煤油代替纯水，并通过真空抽气法进行排气。含水量试验采用电热烘箱烘干法，设置烘干温度 65 °C，烘干至恒重。液塑限试验采用液塑限联合测定法。直剪试验使用重塑土进行固结快剪试验。压缩试验使用重塑土进行标准压缩试验。

2.2 成分分析与微观结构观察

为探讨导致固化污泥土特殊性质的原因，对固化污泥土的物质组成和微观结构进行试验分析。试验样品为 ZK0 处采取的重塑土样。通过元素分析试验和烧失量试验分析固化污泥土中有机质的含量。采用扫描电镜对土中的主要成分进行观察鉴定并分析土体的微观结构特性。元素分析试验使用元素分析仪（型号 Vario EL）进行 CN 联测。烧失量试验使用马弗炉设置烧失温度 550 °C，烧失 2 h。扫描电镜试验仪器型号为 SIGMATM，分辨率 1.3 nm（20 kV），放大倍数 12 ~ 1 000 000 倍连续可调。

2.3 原位测试

原位测试包括十字板剪切试验（ZK1，ZK2）和静力触探试验（ZK5，ZK6），测试点位如图 1 所示。由于原位测试后土样扰动破坏严重，因此未采集土样进行室内试验，室内试验仅以钻孔 ZK0 处的样品为代表。十字板剪切试验采用电阻应变式十字板头，利用静力触探仪贯入装置将十字板头压入到不同的试验深度，借助齿轮扭力装置旋转十字板头，用 JTY-5B 型静探微机量测土的抵抗力矩，从而计算出土的抗剪强度。静力触探试验使用上海科翊 CLD-3 型静力触探贯入机，探头为该公司生产的 S10-2 型双桥静探头，测量仪器为该公司生产的 JTY-5B 型静力测量仪，试验过程中仪器可自动记录被测土层的锥尖阻力和侧摩阻力数值。

3 试验结果

3.1 基本物理状态及液塑限

固化污泥土基本物理状态指标见表 1，可以看出，固化污泥土具有低密度、低土粒密度、高含水量、高孔隙比等特点，工程性质较差。固化污泥土饱和度为 93.1%，处于非饱和态。虽然场区总体埋埋深度高于地下水位，但由于细粒土显著的毛细作用，土体理应为饱和态。固化污泥土非饱和可能是因为其在固化或埋埋过程中形成较多的封闭孔隙，这些孔隙难以被后期的毛细作用饱和，也可能是因为土中有机质降解产生的生物气导致的^[12]。

表 1 固化污泥土基本物理状态指标

Table 1 Basic physical properties of the solidified sludge soil

天然密度 $\rho/$ ($g \cdot cm^{-3}$)	土粒密度 $\rho_s/$ ($g \cdot cm^{-3}$)	含水量 $w/$ %	孔隙比 e	孔隙率 n
1.269	2.295	122.9	3.031	0.752
饱和度 $S_r/$ %	饱和密度 $\rho_{sat}/$ ($g \cdot cm^{-3}$)	干密度 $\rho_d/$ ($g \cdot cm^{-3}$)	浮重度 $\gamma'/$ ($kN \cdot m^{-3}$)	
93.1	1.32	0.57	3.2	

液塑限可用于分析土中水的状态，液限大致表示结合水含量，塑限表示强结合水含量，塑性指数表示弱结合水含量^[13]。固化污泥土的液塑限指标：塑限为 83.0%，液限为 110.8%，塑性指数 27.8%，液性指数为 1.439。试验结果显示，固化污泥土液限高达 110.8%，表明土体中结合水含量高，自由水含量低。同时，固化污泥土的塑限也很高，塑性指数相对较低，表明土体中的结合水主要以强结合水为主，弱结合水含量相对较少。再者存在一个特点，固化污泥土的含水量大于液限，液性指数大于 1，但原状土不呈流塑态，只有在重塑后才会处于流塑态。

3.2 化学成分与结构

3.2.1 有机质含量 固化污泥土有机质含量测定结果见表 2，可以看出，盐酸浸泡前后，总碳的质量分数变化较大，表明固化污泥土中含有较多的碳酸盐类，应该是固化材料产物。盐酸浸泡后固化污泥土中总碳的质量分数为 4.57%，总氮的质量分数为 0.52%，碳氮的质量分数比为 8.92，换算求得有机质的质量分数为 7.87%，蛋白质的质量分数为 3.22%。可见固化污泥土含有较多的有机质，

属有机质土,且有机质腐殖化程度较高。试验测得固化污泥土的烧失量为 14.4%,远远大于 TOC 法测得的有机质的质量分数,说明固化污泥土中含有较多易分解的无机盐类,不适宜用烧失量表示有机质含量。

表 2 固化污泥土的有机质含量¹⁾

Table 2 Contents of organic substance in solidified sludge soil

样品	w/%		w(C)	w/%		
	TOC	TON	w(N)	有机质	蛋白质	烧失量
酸化前泥土	7.86	0.68	11.55	13.54	4.25	14.4
酸化后泥土	4.57	0.52	8.92	7.87	3.22	-

1) 有机质含量为 C 含量乘以 1.724,蛋白质为 N 含量乘以 6.25

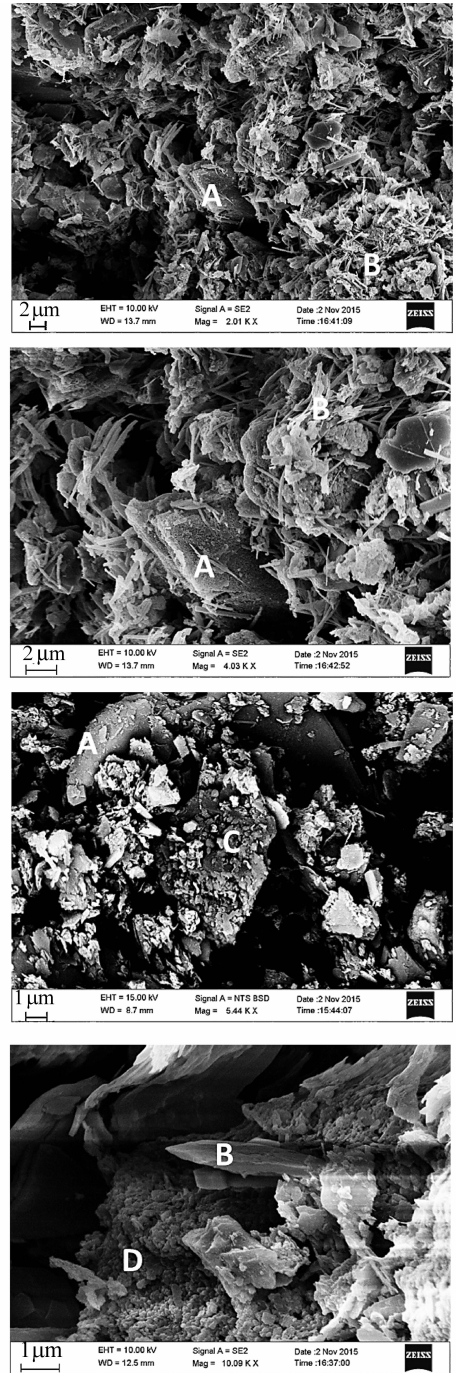
3.2.2 扫描电镜观察 扫描电镜观察结果如图 2 所示,从图中可以发现片状的粘土矿物颗粒、未定型的水化硅酸钙(CSH)凝胶、结晶较好的针状钙矾石以及结构松散的有机絮凝体。粘土矿物无定向地杂乱分布,CSH 凝胶填充在矿物颗粒间起主要胶结作用,针状钙矾石相互穿插形成网状结构,有机质主要吸附在土颗粒表面。土体颗粒间孔隙多,主要孔隙大小为 1~6 μm ,孔隙较大。CSH 凝胶和有机质脱水后结构疏松,可见内部含有大量的微孔隙。

3.3 基本力学性质

3.3.1 直剪强度 将固化污泥土在天然含水量下进行固结快剪试验,试验结果如图 3 所示。在 100 kPa 时,土体的抗剪强度仅为 16.03 kPa,表明重塑后固化污泥土的强度较低。随着固结应力的增加,固化污泥土的抗剪强度呈曲线上升的形式,到 400 kPa 时,抗剪强度增加到 78.84 kPa。通过直线拟合,得到土的黏聚力为 -7.05 kPa,摩擦角为 11.86°。黏聚力接近于零,符合重塑土的特点。

3.3.2 侧限压缩特性 固化污泥土压缩性指标:初始含水量为 122.9%,压缩系数 a_{1-2} 为 3.073 MPa^{-1} ,压缩指数为 1.021,800 kPa 固结后含水量为 71.1%,塑限为 83%。从试验结果可以看出,固化污泥土压缩系数远远大于 0.5,压缩指数也远远大于 0.167,属于高压缩性土。从试验的 $e - \lg p$ 曲线(图 4)发现,固化污泥土的 $e - \lg p$ 关系在压力较大部分并不接近直线,与正常软土有较大差异。固化污泥土在 800 kPa 固结压缩后含水量下降 51.8%,固结后含水量小于塑限。

3.3.3 十字板剪切强度 分别对场区两个点位的固化污泥土和淤泥进行十字板剪切试验,结果如图



A: 粘土矿物; B: 钙矾石;
C: 矿物表面有机质絮凝物; D: 未定型钙质

图 2 固化污泥土 SEM 图像

Fig. 2 SEM images of solidified sludge soil

5 所示。淤泥埋深 3.5~7.0 m,抗剪强度值为 15.1~17.4 kPa,强度随深度的变化较小。填埋固化污泥土埋深 1.0~5.5 m,抗剪强度值为 13.8~23.7 kPa,抗剪强度随深度的增加而显著增大,与淤泥差异明显。在相同埋深下,固化污泥土强度高于场区附近的淤泥。

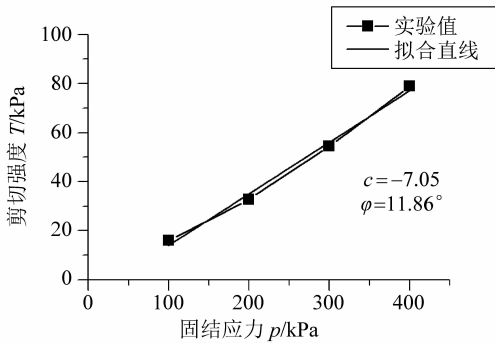


图 3 固化污泥土直剪强度曲线

Fig. 3 Direct shear strength curves of solidified sludge soil

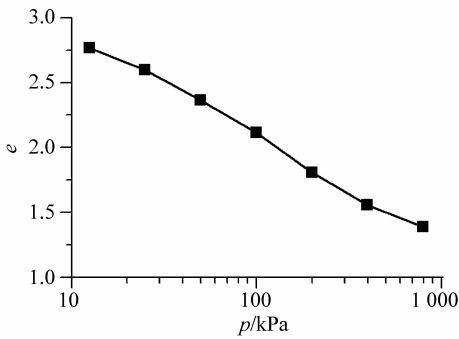


图 4 固化污泥土 e-lg p 曲线

Fig. 4 The e-lg p curve of solidified sludge soil

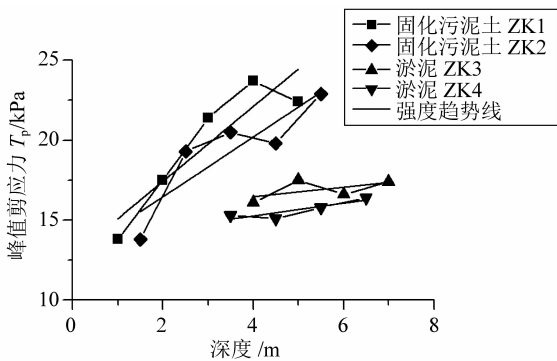


图 5 十字板剪切强度

Fig. 5 Vane shear strength curves

3.3.4 静力触探试验 静力触探结果见表 3，两个点位 ZK5 和 ZK6 得到的锥头阻力平均值均为 0.6 MPa，侧阻力平均值分别为 18.4 和 17.85 kPa，摩阻比平均值分别为 3.07% 和 3.01%，试验结果接近，表明数据较为可靠。根据广东省标准《建筑地基基础检测规范》(DBJ15-60-2008)，由锥头阻力求得地基土承载力特征值 f_{ak} 为 78.9 kPa，变形模量 E_0 为 4.1 MPa，表明固化污泥土具有较高的强度和抗变形能力，工程力学性质优于一般淤泥质土。

表 3 静力触探试验成果表

Table 3 Static cone penetration test results

点位	深度/m	锥头阻力	侧阻力	摩阻比 平均值/%	统计 个数
		平均值/ MPa	平均值/ kPa		
ZK5	3.5 ~ 6.9	0.60	18.14	3.07	35
ZK6	1.5 ~ 4.1	0.60	17.85	3.01	27

4 分析与讨论

固化污泥土是一种使用水泥等固化材料与污泥搅拌混合后形成的固化土体。物质组成主要为水泥的水化产物以及污泥中原有的粘土矿物和有机质。有机质的存在常常使软土表现出低密度、高塑性、高含水率、高孔隙比、高压缩性、低强度等特点^[14-15]。水泥产物 CSH 凝胶的胶结作用大大提高了土体的粘聚力，钙矾石所形成的针网状结构进一步提高了土体的结构强度。固化污泥土在形成过程中受搅拌作用，属于松散的搅拌体，导致其孔隙比大。填埋后，逐渐压实，但填埋时间较短，仍属于次固结土。从前面的试验结果可知，固化污泥土具有许多特殊的性质，下面将分别对其含水特性、强度特性和变形特性进行讨论分析。

4.1 含水特性

固化污泥土具有含水量高，结合水含量高，含水量高于液限却不呈流塑态的特点。结合水含量高主要与其成分中含有较多未硬化的 CSH 凝胶和有机质有关，它们都是结合水的主要持水物质，脱水后会形成众多微孔隙，如图 5 所示。同时，固化污泥土还存在较多的大孔隙，自由水则主要存在于这些大孔隙中。由于水泥产物的强化作用，使得土体具有较高的结构强度，所以当含水量高于液限时，土体不呈现流塑态，而当重塑后，结构强度丧失，土体变为流塑态。

4.2 强度特性

在 100 kPa 固结应力时，重塑固化污泥土的直剪强度仅为 16.03 kPa。十字板测得原状土在 5.5 m 处（自重应力约 70 kPa）的剪切强度为 22.9 kPa。原状土的强度大大高于重塑土，表明土体具有较高的结构性。这主要是受到水泥固化的影响，原状土颗粒之间以水泥产物为胶结物，具有较高的强度。当土体完全重塑后，水泥胶结物被破坏，土体颗粒表面主要为有机絮凝物质，颗粒间接触关系由水泥胶结变为有机质絮凝粘合。由于有机质连接强度低、黏聚力小，而且有机质持水度高，大量水

分起润滑作用, 摩擦角也很小, 导致土体的强度大大降低。另一方面, 不管是原状土还是重塑土, 固化污泥土抗剪强度都表现出随固结应力的增加而大幅增加的特点。主要是因为固化污泥土尚处于欠固结状态, 存在较多的孔隙, 随着固结应力的增加, 孔隙被压缩, 密实度增加, 土颗粒间接触点增加, 土体强度增加。

4.3 变形特性

重塑土的压缩系数 a_{1-2} 为 3.073 MPa^{-1} , 压缩指数为 1.021, 具有超高的压缩性。高压缩性主要是因为土体中含有大量的大孔隙, 这是由其欠固结状态导致的。同时土中的 CSH 凝胶和有机质都含有大量的微孔隙, 进一步提高了土体的压缩性。静力触探的结果显示固化污泥土具有高的变形模量, 表明虽然固化污泥土具有高的孔隙比, 但由于原状土结构强度高, 这些孔隙难以被压缩, 表现为高的抵抗变形能力。这种高孔隙又高结构性的特点类似于黄土。值得注意的是有机质的存在会大大提高土体的蠕变性^[16-17], 而且固化污泥土处于欠固结状态, 在长期荷载作用下, 会产生较大的次固结沉降。

5 结 论

1) 填埋固化污泥土具有低密度、低比重、高含水量、高孔隙比、高液塑限等特点, 其结合水含量高, 含水量高于液限却不呈流塑态。

2) 固化污泥土的物质组成主要为水泥的水化产物以及污泥中原有的粘土矿物和有机质。有机质的质量分数为 7.87%, 蛋白质的质量分数为 3.22%, 碳氮质量分数比为 8.92, 有机质主要吸附于矿物表面, 呈絮凝状。水泥的水化产物起主要胶结作用, 大大提高了土体的结构强度。土体颗粒间孔隙多, 孔隙较大, CSH 凝胶和有机质内部含有大量的微孔隙。

3) 固化污泥土十字板抗剪强度值为 $13.8 \sim 23.7 \text{ kPa}$, 强度随深度的增加而增加, 重塑后直剪强度大大降低, 直剪强度随固结应力的增加呈曲线上升的形式。

4) 固化污泥土地基土承载力特征值 f_{ak} 为 78.9 kPa , 变形模量 E_0 为 4.1 MPa , 重塑后其压缩性大大增强, 压缩系数 a_{1-2} 为 3.073 MPa^{-1} 。

5) 固化污泥土中水泥产物的固化作用、有机质的影响以及结构上多孔隙欠固结的特点, 共同造成了其特殊的含水特性、强度特性和变形特性。

致谢: 感谢深圳市长勘勘察设计有限公司提供勘察资料。

参考文献:

- [1] 郭广慧, 杨军, 陈同斌, 等. 中国城市污泥的有机质和养分含量及其变化趋势[J]. 中国给水排水, 2009, 25(13): 120 - 121.
GUO Guanghui, YANG Jun, CHEN Tongbin, et al. Concentrations and variation of organic matter and nutrients in municipal sludge of China[J]. China Water&Waste Water, 2009, 25(13): 120 - 121.
- [2] 赵乐军, 戴树桂, 辜显华. 污泥填埋技术应用进展[J]. 中国给水排水, 2004, 20(4): 27 - 30.
ZHAO Lejun, DAI Shugui, GU Xianhua. Progress in the application of sludge landfill technology [J]. China Water&Waste Water, 2004, 20(4): 27 - 30.
- [3] 宋丰产, 张向炎, 张楠. 城市污水处理厂污泥处置与资源化利用途径探讨[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(36): 20891 - 20892.
SONG Fengchan, ZHANG Xiangyan, ZHANG Nan. Discussion on disposal and utilization of sludge in sewage treatment plant [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, 38(36): 20891 - 20892.
- [4] JIN L, ZHANG G, TIAN H. Current state of sewage treatment in China[J]. Water Research, 2014, 66: 85 - 98.
- [5] 姚刚. 德国的污泥利用和处置(II)[J]. 城市环境与城市生态, 2000, 13(2): 24 - 26.
YAO Gang. Sewage sludge treatment, use and disposal in Germany(II)[J]. Urban Environment & Urban Ecology, 2000, 13(2): 24 - 26.
- [6] 曹永华, 闫澍旺, 赵乐军. 固化污泥的工程性质及微观结构特征[J]. 岩土力学, 2006, 27(5): 740 - 744.
CAO Yonghua, YAN Shuwang, ZHAO Lejun. Engineering properties and microstructure feature of solidified sludge[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(5): 740 - 744.
- [7] 李磊, 徐菲, 周灵君, 等. 固化污泥压缩特性研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(1): 171 - 176.
LI Lei, XU Fei, ZHOU Lingjun, et al. Compression characteristics of solidified sewage sludge [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(1): 171 - 176.
- [8] 薛飞, 易进翔, 徐菲. 固化污泥的压实特性及微观机理研究[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(31): 90 - 94.
XUE Fei, YI Jinxiang, XU Fei. Study on compaction characteristics and micromechanism of solidified sludge [J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14

- (31): 90-94.
- [9] 易进翔, 李磊, 崔猛, 等. 固化污泥的压缩特性研究[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(27): 107-111.
YI Jinxiang, LI Lei, CUI Meng, et al. Study on compression properties of solidified sludge[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(27): 107-111.
- [10] 李磊, 朱伟, 吉顺健, 等. 微生物对固化/稳定化污泥长期强度的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(12): 1778-1782.
LI Lei, ZHU Wei, JI Shunjian, et al. Influence of micro-organism on long-term strength of solidified/stabilized sludge[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(12): 1778-1782.
- [11] 易进翔, 孟琨, 薛飞, 等. 污泥固化土填埋处置中降解规律的研究[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(5): 284-288.
YI Jinxiang, MENG Kun, XUE Fei, et al. Study on degradation law of solidified sludge in landfill disposal[J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(5): 284-288.
- [12] 徐浩峰. 含生物气非饱和软土的固结理论研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
XU Haofeng. Studies on the consolidation theory for unsaturated soft soils containing biogas[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.
- [13] 李广信, 张丙印, 于玉贞. 土力学[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2013.
- [14] 吕岩, 仵磊, 徐燕, 等. 有机质对草炭土物理力学性质影响的机理分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(4): 655-660.
LÜ Yan, NIE Lei, XU Yan, et al. The mechanism of organic matter effect on physical and mechanical properties of turf soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(4): 655-660.
- [15] 牟春梅, 李佰锋. 有机质含量对软土力学性质影响效应分析[J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(3): 42-46.
MU Chunmei, LI Baifeng. Influence of organic matter on mechanical character of soft soil[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2008, 35(3): 42-46.
- [16] OLIVEIRA P J V, CORREIA A A S, LOPES T J S. Effect of organic matter content and binder quantity on the uniaxial creep behavior of an artificially stabilized soil[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2014, 140(9): 194-198.
- [17] 谷任国, 房营光. 有机质对软土流变性质影响的试验研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(1): 101-106.
GU Renguo, FANG Yingguang. Experiment study of the effects of organic matter on the rheological characteristics of soft soils[J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(1): 101-106.