中文核心期刊 中科双效期刊 CSCD核心期刊 中国科技核心期刊

Caj-cd规范获奖期刊

#### 基于固结-固化复合技术对温州淤泥加固的试验研究

袁 波,邵吉成,骆嘉成,叶宏峰

An experimental study of reinforcement of the Wenzhou sludge based on the consolidation and solidification composite technology

YUAN Bo, SHAO Jicheng, LUO Jiacheng, and YE Hongfeng

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202103035

# 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

# 预应力锚索修复含微裂纹抗滑桩模型试验研究

Model test of anti-slide pile with micro-crack repaired by prestressed anchor cables 周云涛, 石胜伟, 蔡强, 张勇, 李乾坤, 梁炯, 程英建 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 104-111

## 侵蚀环境中碱渣-矿渣固化淤泥的力学性质

Mechanical properties of the soft soil stabilized with soda residue and ground granulated blast furnace slag under the erosion environment 何俊, 栗志翔, 石小康, 王小琦 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 83–89

## 基于光纤传感技术的土工格栅变形及受力研究

A study of deformation and stress of geogrids based on optical fiber sensing technology 刘倩萁, 张孟喜, 洪成雨 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 119–125

# 基于聚氨酯复合基材的岩质边坡客土生态修复试验研究

An experimental study of the ecological restoration of rock slope based on polyurethane composite—based materials 喻永祥, 郝社锋, 蒋波, 刘瑾, 李明, 李伟, 宋泽卓 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 174–181

# 生物酶改良淤泥质土的时效强度试验研究

Experimental study of aging strength of the mucky soils improved with bio-enzyme 董辉, 程子华, 刘禹岐, 朱宪明 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 84-94

## 基于高分子复合材料改良砂土三轴剪切试验研究

Triaxial shear test of sand improved by polymer composite

王龙威, 刘瑾, 奚灵智, 武立林, 郑川, 祁长青 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 149-157



#### DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202103035

袁波, 邵吉成, 骆嘉成, 等. 基于固结-固化复合技术对温州淤泥加固的试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(1): 66-74. YUAN Bo, SHAO Jicheng, LUO Jiacheng, *et al.* An experimental study of reinforcement of the Wenzhou sludge based on the consolidation and solidification composite technology[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(1): 66-74.

# 基于固结-固化复合技术对温州淤泥加固的试验研究

袁 波<sup>1</sup>, 邵吉成<sup>1,2</sup>, 骆嘉成<sup>1</sup>, 叶宏峰<sup>1</sup> (1. 浙江省第十一地质大队, 浙江 温州 325006; 2. 浙江华坤地质发展有限公司, 浙江 温州 325006)

摘要: 为了对软弱淤泥土进行加固,使之满足工程建设所需的一定承载力,在试验基地采用固结-固化复合技术对淤泥进行加固研究。试验时,将一定厚度淤泥分为浅层固化加固层和深层固结加固层;浅层(≤1 m)淤泥采用固化技术进行加固,使之形成高强度硬壳层;对于深层(>1 m)淤泥,采用真空预压技术进行加固,以提高深层淤泥的承载力并控制加固土体的后期沉降量。试验结果表明,当固化剂掺量为 0.6%~5.0% 时,浅层固化淤泥承载力特征值在 109~330 kPa; 固结-固化复合技术对土体加固效果突出,分层加固土体整体的承载力特征值在 89~230 kPa; 浅层淤泥经过固化处理后,土体强度较高,对地表荷载起到了明显的扩散作用,有效地减小了地表荷载在下卧层土体中产生的附加应力;多数试验单元浅层固化土的应力扩散角在 19.474°~26.303°之间。

关键词:淤泥;固结-固化复合技术;承载力;硬壳层;应力扩散角

中图分类号: TU472.5 文献标志码: A 文章编号: 1000-3665(2022)01-0066-09

# An experimental study of reinforcement of the Wenzhou sludge based on the consolidation and solidification composite technology

YUAN Bo<sup>1</sup>, SHAO Jicheng<sup>1,2</sup>, LUO Jiacheng<sup>1</sup>, YE Hongfeng<sup>1</sup>

(1. The 11th Geology Team of Zhejiang Province, Wenzhou, Zhejiang 325006, China;

2. Zhejiang Huakun Geological Development Co. Ltd., Wenzhou, Zhejiang 325006, China)

**Abstract:** In order to reinforce the soft sludge and makes it meet the certain bearing capacity of the engineering construction, the consolidation and solidification composite technology is used to reinforce the sludge in the field site. During the test, a certain thickness of sludge is divided into a shallow solidification layer and a deep consolidation layer. The solidification technology is used to reinforce the shallow ( $\leq 1$  m) sludge so as to form a high-strength overlying crust. For the deep (>1 m) sludge, the vacuum preloading technology is used to improve the bearing capacity of the deep sludge and control the later settlement of the reinforced soil. The experimental results show that the characteristic value of the shallow solidified soil bearing capacity ranges from 109 to 330 kPa when the dosage of solidified agent is  $0.6\% \sim 5.0\%$ . The consolidation and solidification composite technology has a prominent effect on the reinforcement of the sludge and the characteristic value of the overall bearing capacity of the layered reinforced soil varies between 89 and 230 kPa. After the solidification treatment of the shallow sludge,

收稿日期: 2021-03-09; 修订日期: 2021-05-08 投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 温州市基础性科研项目(S2020024)

第一作者: 袁波(1970-), 男, 高级工程师, 主要从事地质勘查及管理工作。E-mail; dzyb2851@126.com

通讯作者: 邵吉成(1992-), 男, 硕士, 主要从事软基处理、环境岩土工程等领域的研究和应用。E-mail: shaojicheng2021@126.com

the soil strength is higher, which can generate an obvious diffusion effect on the surface load and effectively reduces the additional stress in the underlying layer caused by the surface load. The stress diffusion angle of shallow solidified soil in most test units varies between 19.474° and 26.303° in this experiment.

**Keywords**: sludge; consolidation and solidification composite technology; bearing capacity; overlying crust; stress spread angle

淤泥具有黏粒含量高、含水率高、孔隙比大以及 强度低等诸多不良工程性质[1-3],当前处理淤泥的常 见方式有排水固结法和固化法,真空预压技术也被广 泛应用于海涂围垦、高速公路、机场等各种工程建设 中的软土地基加固[4-8]。但大量工程实践也表明,真 空预压技术在处理软土地基时,存在诸多工程缺陷, 如在处理高含水率淤泥的过程中,细小的土颗粒会在 排水板滤膜孔隙中聚集,排水板滤膜因产生淤堵现象 进而导致渗透性下降,限制了负压沿径向的有效传 递,土体有效加固深度小,强度增长有限,处理后的地 基承载力仍然较低[9-12]。相比较真空预压技术,固化 技术对淤泥的处理具有耗时短、土体承载力提升效果 优良等优点。生石灰、水泥是工程上处理淤泥常用的 固化材料[13-15],但这两种固化材料均存在能耗大、排 放多等问题,为此,国内外学者一直在努力开发节能、 环保的高性能固化材料,因而钢渣型复合基材、活性 氧化镁等材料不断被应用于对软土的固化加固工程 中[16-18]。我国东南沿海地区广泛分布深厚的淤泥层, 若采用固化技术对淤泥进行处理造价较高,因此固化 技术无法像真空预压技术一样大规模应用于淤泥软 土的处理。为探究一种适合工程上大规模加固淤泥 的方式,使加固后的淤泥土具有较高的承载力,且满 足造价相对较低这一特点,本文将真空预压技术与固 化技术进行复合,采用固结-固化复合技术对淤泥进行 加固。对于浅层淤泥,采用固化法进行加固,使浅层 土体胶结为高强度土体;对于深层淤泥,采用真空预 压技术使淤泥产生排水固结,提高深层淤泥的强度, 并相应地减少了土体的后期沉降量。本研究结合两 种技术,在现场试验基地对淤泥进行分层加固,并采 用平板荷载试验检测淤泥土的复合加固效果。

# 1 试验材料与方法

# 1.1 试验材料

将温州某工地地下开挖淤泥作为本次试验的加固对象,取样深度为地表以下 10~15 m,淤泥表观呈深灰色,流塑状,有滑腻感。依据《土工试验方法标准》<sup>[19]</sup>测得淤泥基本物理指标见表 1。固化剂由衢州市良诚钙业有限公司提供,主要成分为 CaO,其主要

氧化物成分及颗粒大小见表 2。

表 1 淤泥的基本物理指标

Table 1 Basic physical properties of sludge

含水率/%	黏粒含量/%	液限/%	塑限/%	有机质含量/%	孔隙比	相对密度
66.3	49.4	52.5	27.5	3.4	1.821	2.67

表 2 固化剂的化学成分及粒径范围

Table 2 Chemical compositions and particle size range of the solidified agent

化学成分/%				粒径分布/%			
CaO	MgO	CO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	≤100μm	≤200μm	≤2mm	
85.21	2.11	0.31	0.04	70.21	88.62	100	

#### 1.2 试验方案

在试验基地开挖基坑并回填淤泥,各试验单元规格为7m×7m×2.3m。回填淤泥沿竖向划分为浅层固化加固段(1m)和深层固结加固(1~2.3m)段(图1)。各试验单元固化材料按质量掺入比如表3所示,根据各试验单元预加固淤泥的质量,计算相应的固化剂掺入量;采用电子吊秤称取固化剂,均匀平铺于淤泥表面;通过ALLU搅拌斗完成固化剂与淤泥的混合,搅拌时需严格控制淤泥的搅拌深度。当完成各试验单元浅层淤泥与固化剂的搅拌后,从固化淤泥表面向下打设排水板,排水板水平间距为700~1000mm,深度超过回填淤泥的厚度,并在固化淤泥表面依次铺设1层编织布、1层水平排水管、1层土工布、2层密封膜,最后开启真空泵对各试验单元淤泥进行固结加固,并实时监测现场的真空度和各试验单元的表层沉降量。

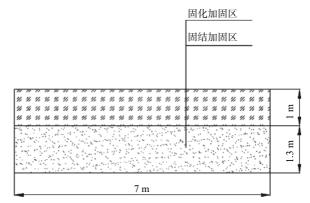


图 1 淤泥沿竖向的加固示意图

Fig. 1 Schematic diagram of vertical reinforcement of sludge in each test unit

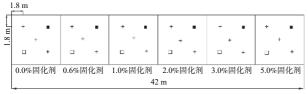
#### 表 3 各试验单元固化剂掺入比

Table 3 Mixing ratio of the curing agent in each test unit

编号	GH-1	GH-2	GH-3	GH-4	GH-5	GH-6
固化剂掺量/%	0.0	0.6	1.0	2.0	3.0	5.0

#### 1.3 监测方案

如图 2 所示,在真空预压期间,对各试验单元土体进行沉降监测,监测点有 3 组,第一组距试验区边缘各 1.8 m,第二组位于试验区中心,第三组位于距试验区边缘各 1.8 m,3 组监测点位置与静力触探测试点位置相同。当各试验区各监测点沉降量平均值连续2 天均低于 1 mm/d 时,结束真空预压,并拆除真空抽排系统。



- + 沉降监测点和静力触探测试点位置
- 0.5 m×0.5 m 平板静压点位置
- □ 0.707 m×0.707 m 平板静压点位置

图 2 沉降监测点

Fig. 2 Monitoring points for settlement

#### 1.4 承载力检测方式

#### 1.4.1 静力触探试验

在对试验基地淤泥进行加固处理后,当固化淤泥的养护龄期达到7d时,采用静力触探仪对各试验单元加固淤泥进行承载力测试。静力触探测试点有3个(图2),取测试点平均值作为代表性结果。

# 1.4.2 平板荷载试验

结束真空预压后,对各试验单元加固淤泥进行平板荷载试验,分别先后采用规格为 0.5 m×0.5 m和 0.707 m×0.707 m的平板对土体进行平板荷载试验,试验时平板距边界距离试验区边缘各 1.8 m(图 2)。

根据半无限空间弹性体附加应力分布辛内斯克 (Boussinesq J)解及《建筑地基检测技术规范》条文说明<sup>[20]</sup>,试验中承压板面积为 0.25 m²(板宽 0.50 m)的静压试验主要目的是评价厚度为 1.0 m第一层土的承载力特性,即浅层固化土的承载力特性;而压板面积为 0.5 m²(板宽 0.707 m)的静压试验主要目的是评价厚度为 2.3 m 双层土的承载力特性,即分层加固土体的整体承载力。为精确比较各试验单元加固土体承载力,根据平板荷载试验结果按土体沉降量确定地基承载力特征值,土体的极限荷载按照加载时沉降量为

6% 倍平板宽度对应的荷载取值; 土体的承载力特征 值按照沉降量为 1% 倍平板宽度取对应的荷载取值, 且 所取的承载力特征值不应大于土体极限荷载的一半。

# 2 试验结果

#### 2.1 地表沉降量的监测结果

真空预压过程中, 膜内真空度始终保持在 82~90 kPa之间。结束真空预压后, 各试验单元土体表面沉降量随时间的变化如图 3 所示。真空预压时间(T)共计 57 d, 在真空预压进行的前 20 d, 各试验单元土体表面累计沉降量(s)相差较小。随着真空预压时间的增加, 未添加固化剂的纯淤泥试验单元土体表面累计沉降量较大,逐渐超过其它分层加固试验单元土体的累计沉降量。当真空预压进行到 57 d 时, 纯淤泥区域表面沉降量达 134 mm; 固化剂掺量为 0.6%、1.0%、2.0%、3.0%和 5.0%的试验单元土体表面沉降量分别为 110.3, 106.2, 113.5, 112.6, 106.0 mm。随着固化剂掺量的增加, 土体表面沉降量并未呈现有规律的减小趋势, 这可能是试验的偶然误差造成的, 但整体上均比纯淤泥区域土体的累计沉降量小。

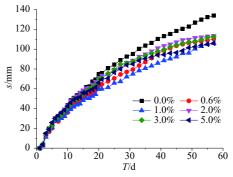


图 3 各试验单元土体沉降量监测结果

Fig. 3 Monitoring results of the soil settlement in each test unit

淤泥经固结-固化复合技术分层加固后,土体的沉降量由2部分组成,即浅层固化层土体沉降量 $S_{ll}$ 和深层淤泥沉降量 $S_{ll}$ 。固化剂加入淤泥后,可有效提高浅层土体的强度,在真空预压条件下,土体很难产生排水固结,浅层固化土产生的沉降量较小。相比较浅层固化土体,深层淤泥土强度较低,在真空预压荷载的附加应力作用下会产生固结排水,淤泥孔隙被压缩使地表产生下沉,为土体在竖向沉降量的主体部分。通过对试验区土体沉降量的监测可知,浅层淤泥完成固化后,固化土下部软弱淤泥在附加应力作用下仍会产生相应的沉降,因此对固化土下部的软弱土体进行

有效处理,不仅提高了下卧层土体的承载力,同时在一定程度上会减小分层加固土体的整体沉降,有利于提升分层加固土体的整体承载力。

## 2.2 静力触探试验结果

在各试验单元固化淤泥土的养护龄期达到 7 d时,对各单元土体进行静力触探试验,静力触探试验 钻杆钻进深度为 2 m,结果如图 4 所示。由于仅对浅层淤泥进行固化,因此浅层固化段土体比贯入阻力值 ( $P_s$ )较大,埋深大于 1 m 区域是未固化的淤泥,比贯入阻力值极低。

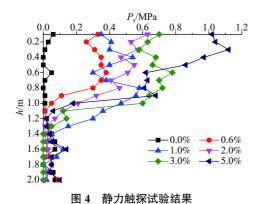


Fig. 4 Results of the cone penetration test

图 5 为分层加固土体浅层 1 m 固化土的比贯入阻力平均值。未添加固化剂淤泥的比贯入阻力平均值为 0.028 5 MPa。低剂量固化剂即对淤泥有良好的加固效果,当固化剂掺量为 0.6%~1.0% 时,土体养护 7 d 后,固化土的比贯入阻力平均值在 0.279~0.439 MPa。随着固化剂掺量的增加,固化淤泥土的比贯入阻力平均值平稳增加。当固化剂掺量为 5.0% 时,固化淤泥土的比贯入阻力平均值达到 0.773 MPa。试验结果表明,本试验采取的固化剂对淤泥有良好的固化后效果。

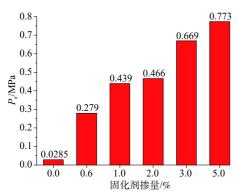


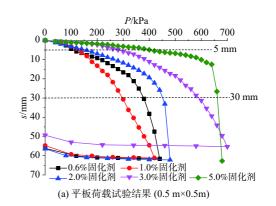
图 5 浅层 1 m 固化土比贯入阻力平均值

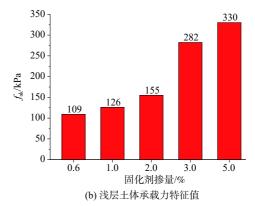
Fig. 5 Summary of the average values of the specific penetration resistance in the shallow (1 m) solidified soil

#### 2.3 平板荷载试验结果

## 2.3.1 浅层固化土平板荷载试验结果(0.5 m×0.5 m)

各试验单元土体经过真空预压加固后, 在规格为  $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m} \text{ 平板静压下的试验结果如图 } 6(a) 所示, 各 试验区域土体均呈现局部剪切破坏。根据各试验单元土体在平板静压下的沉降量确定土体承载力特征值(<math>f_{ak}$ )和极限荷载( $p_u$ ), 结果分别如图 6(b)(c) 所示。





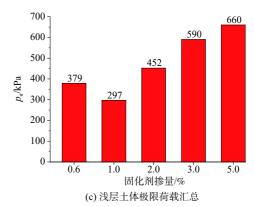


图 6 浅层固化土平板荷载试验结果 Fig. 6 Results of the plate loading test of the shallow solidified soil

本次试验压板面积为 0.25 m², 主要目的是评价浅 层固化土的承载力特性。由试验结果可知, 低剂量固 化剂(0.6%~1.0%)即可对试验淤泥产生较为可观的固化效果,浅层固化土的承载力特征值在109~330 kPa,表明试验中选取的固化剂很适合对类似于本次试验淤泥的加固。各试验单元土体的极限荷载在297~660 kPa 范围,个别异常数据是试验过程中浅层固化土体搅拌不均或搅拌深度未到设定深度造成的。

根据规格为  $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$  的平板静压下的试验结果,可以估算浅层土体的变形模量( $E_0$ ),估算方式如下:

$$E_0 = I_0 (1 - \mu^2) \frac{pd}{s} \tag{1}$$

式中: I<sub>0</sub>——刚性承压板形状系数, 方形承压板取 0.886;

 $\mu$ ——土的泊松比,取 0.42;

d─\_\_\_承压板边长, 取 0.5 m;

*p*—*p-s* 曲线上线性段的压力/kPa, 取相应试验 单元土体的承载力特征值;

s—与p对应的沉降量/mm。

根据计算结果,各试验单元浅层固化土的变形模量(E<sub>0</sub>)如图 7 所示。当向浅层淤泥中添加 0.6% 的固化剂后,经过 57 d 的养护及真空预压加固处理后,土体的变形模量为 8 MPa。随着固化剂掺量的增加,浅层固化土的变形模量呈现明显的增大趋势。当固化剂掺量为 5.0% 时,固化土的变形模量提升至 34.4 MPa,表明固化剂对软弱淤泥的工程性质有明显的改善效果。

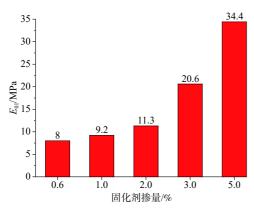
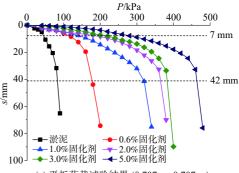


图 7 浅层固化土体变形模量

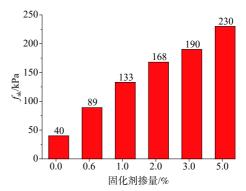
Fig. 7 Deformation modulus of the shallow solidified soil

# 2.3.2 分层加固土体平板试验结果(0.707 m×0.707 m)

各试验单元分层加固土体在规格为 0.707 m× 0.707 m平板静压下的试验结果如图 8(a)所示,各试验区域土体均呈现冲剪破坏。未添加固化剂淤泥的极限荷载对应沉降量按板宽的 6%(42 mm)取值,对应的值为 80 kPa,其承载力特征值按板宽的 1%(7 mm)取值,对应值为 40 kPa。试验表明,经过 57 d



(a) 平板荷载试验结果 (0.707 m×0.707 m)



(b) 各试验单元土体承载力特征值

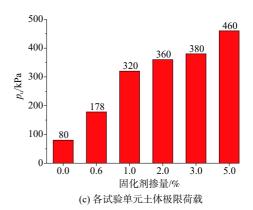


图 8 分层加固土体平板试验结果

Fig. 8 Results of the plate loading test of the layered reinforced soil (0.707 m×0.707 m)

的真空预压处理后,淤泥承载力有一定的提升,但提 升效果有限。

本次试验承压板面积为 0.5 m², 主要目的是评价分层加固土体的整体承载力特性。对平板荷载试验结果进行统计整理,各试验单元土体整体承载力特如图 8(b)所示。当固化剂掺量为 0.6% 时,分层加固土体整体的承载力特征值可达 89 kPa, 远高于纯淤泥经真空预压加固后的承载力特征值 40 kPa。随着固化剂掺量的增加,分层加固土体的承载力特征值呈现明显的增大趋势。当固化剂掺量为 5.0% 时,分层加固土体的整体承载力提升至 230 kPa, 土体展现出良好的承

载力特性,表明淤泥经过固结-固化复合技术处理后, 土体承载力提升效果明显。

分层加固土体的极限荷载如图 8(c)所示,随着固化剂掺量的增加,固结-固化复合技术加固土的极限荷载呈现明显的增大趋势。当固化剂掺量为 1.0% 时,土体的极限荷载可达 320 kPa。各试验单元土体在规格为 0.707 m×0.707 m 平板静压下的数据汇总如表 4 所示。

表 4 土体的平板荷载试验数据汇总(0.707 m×0.707 m) Table 4 Summary of the plate loading test data of soil

区域	固化剂 掺量/%	加载时土体 极限荷载/kPa	土体极限 荷载/kPa	土体承载力 特征值/kPa	破坏形式
GH-1	0.0	80	80	40	冲剪破坏
GH-2	0.6	180	178	89	冲剪破坏
GH-3	1.0	320	320	133	冲剪破坏
GH-4	2.0	360	360	168	冲剪破坏
GH-5	3.0	380	380	190	冲剪破坏
GH-6	5.0	460	460	230	冲剪破坏

# 3 固结-固化复合技术机理探讨

## 3.1 双层地基应力扩散模型

浅层淤泥经过固化处理后形成了高强度的硬壳层,这一硬壳层对附加应力起到了较大的扩散作用,有效地减小了地表荷载在下卧层土体中产生的附加应力。浅层土体经固化后与深层土体形成的双层地基,硬壳层以下的下卧层淤泥的应力计算简图如图 9 所示,土体产生破坏时极限荷载可以表示为<sup>[21]</sup>:

$$p_{z} = \frac{pBL}{(B + 2Z\tan\theta)(L + 2Z\tan\theta)}$$
 (2)

式中:  $L \setminus B$  — 承压板的长度和宽度, 均取 0.707 m;

Z—基础底面至软弱下卧层顶面的距离,取1m;p—基底平均压力值,为各试验区土体土体的极限荷载;

θ——地基压力扩散角。

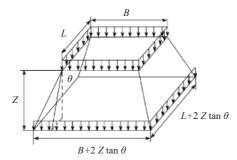


图 9 应力扩散角计算简图

Fig. 9 Calculation diagram of the stress spread angle

淤泥经过真空预压之后的极限荷载为 80 kPa, 由于固化土下方淤泥层未添加固化剂, 仅采用真空预压进行加固, 将该层土体极限荷载近似取值为 80 kPa, 根据各试验单元土体在规格为 0.707 m×0.707 m平板静压下的极限荷载, 反算出各试验单元浅层固化土的应力扩散角 θ 近似值:

$$\theta = \arctan\left(\frac{\sqrt{\frac{pB^2}{p_z}} - B}{2}\right) \tag{3}$$

其中,  $p_z$  取 80 kPa, B 取值均为 0.707 m, p 为各试验单元在规格为 0.707 m×0.707 m 平板静压下双层地基的极限荷载。各试验单元浅层固化土应力扩散角估算值如表 5 所示。

表 5 双层地基模型数据汇总

Table 5 Data summary of the double-layer foundation model

区域	固化剂 掺量/%	第一层土体 变形模量 <i>E</i> 01/MPa	第二层土体 变形模量 $E_{02}$ /MPa	模量比	扩散角 θ/(°)
GH-1	0.0	4.0	4.0	1.0	/
GH-2	0.6	8.0	4.0	2.0	10.027
GH-3	1.0	9.2	4.0	2.3	19.474
GH-4	2.0	11.3	4.0	2.8	21.628
GH-5	3.0	20.6	4.0	5.2	22.638
GH-6	5.0	34.4	4.0	8.6	26.303

由估算结果可知,当固化剂掺量为 0.6% 时,浅层固化土的应力扩散角为 10.027°,其它试验单元浅层固化土的应力扩散角都比较大,其值在 19.474°~26.303°之间。在整体上,随着固化剂掺量的增加,浅层固化土的应力扩散角呈现增大趋势。浅层土体经固化处理后,形成高强度整板式结构,具有突出的应力扩散效果,有效减小了地表荷载在下卧层软弱土中产生的附加应力,从而使分层加固后的土体地基承载力得到有效提升。相应地,采用真空预压技术对下部软弱层淤泥进行加固,可以提高双层地基的整体承载力。

根据淤泥在规格为  $0.707\times0.707$  m 平板静压下的试验数据,按式(1)求出淤泥经过真空预压加固后土体的变形模量  $E_{02}$  为 4 MPa,将分层加固试验区下卧层淤泥的变形模量近似取 4 MPa,结合各试验单元浅层固化土的变形模量(图 7),可以得出各试验单元浅层固化土与其下卧层淤泥的变形模量之比,结果如表 5 所示。当浅层固化土与其下部淤泥的变形模量之比在  $2.0\sim2.8$  时,随着双层土变形模量比值的增加,浅层

固化土应力扩散角的增长幅度明显,其值在10.027°~21.638°之间,如图 10 所示。当双层土变形模量之比超过2.8 时,随着比值的增大,应力扩散角仍然呈现增长趋势,但增长幅度较为缓慢,其值在22.638°~26.303°之间。采用固结-固化复合技术对淤泥进行加固处理时,适当增加浅层淤泥固化剂的掺入量,可有效提升固化土的变形模量,在一定程度上可以增大浅层固化土的应力扩散角,相应地减少了下卧层淤泥的附加应力,在整体上有利用提升地基的承载力。

## 3.2 加固淤泥开挖效果

在分层加固土体完成各项检测后,对现场土体进行开挖,沟槽开挖深度为 1.5 m,宽度为 1 m,如图 11 所示。固化加固层与固结加固层界限较为明显(图 11c),固化土强度较高,手感坚硬;淤泥层经过真空预压处理后土体强度较处理之前有一定提升,但提升幅度不大,土体仍呈现软弱状态,手指可轻按出指印,总体上与上部固化土体衔接完整、密实。未经固化处理的淤泥,在开挖时沟槽未坍塌,但开挖约 1 h 后,沟槽塌陷(图 11d),表明仅采用真空预压技术对淤泥进行处理

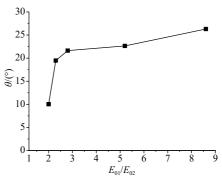


图 10 变形模量之比与应力扩散角的关系

Fig. 10 Relationship between the ratio of deformation modulus and stress spread angle

后强度较低。相比较而言,固化处理后的土体均未产生塌陷现象,因此在实际工程中,采用真空预压处理后的土体不适合直接充当地基土。可将真空预压加固淤泥作为下卧层,而地基上部的浅层采用固化土,二者结合使用即可发挥上部固化土强度高的优势,又可避免下部淤泥层采用固化法处理以导致固化材料浪费现象。

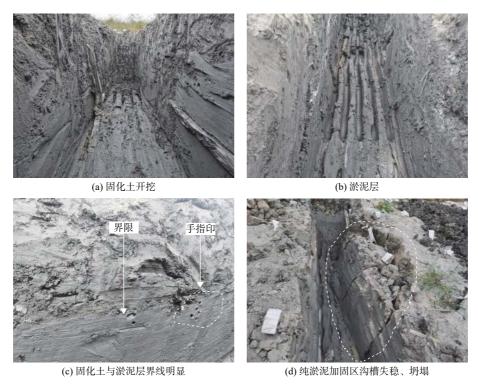


图 11 加固淤泥开挖效果

Fig. 11 Excavation effect of the reinforced sludge

# 4 结论

(1)低剂量固化剂即可对淤泥产生理想的固化效

果,可对淤泥进行有效固化,土体承载力特征值在109~330kPa。

(2)固结-固化复合技术对土体加固效果突出,在

试验范围内,分层加固后的土体整体承载力特征值在89~230 kPa,土体的极限荷载在178~460 kPa。

(3)浅层淤泥经过固化处理后,形成了高强度硬壳层,对地表荷载起到了明显的扩散作用,有效地减小了地表荷载在下卧层土体中产生的附加应力。在本试验中,多数试验单元浅层固化土体的应力扩散角在19.474°~26.303°之间。

## 参考文献(References):

- [1] 王臻华, 项伟, 吴雪婷, 等. 碱性氧化剂对水泥固化淤泥强度的影响研究 [J]. 岩土工程学报, 2019, 41(4): 693 699. [WANG Zhenhua, XIANG Wei, WU Xueting, et al. Influences of alkaline oxidant on strength of cement-stabilized sludge [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(4): 693 699. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 谈云志, 柯睿, 陈君廉, 等. 偏高岭土增强石灰-水泥固化淤泥的耐久性研究[J]. 岩土力学, 2020, 41 (4): 1146 1152. [TAN Yunzhi, KE Rui, CHEN Junlian, et al. Enhancing durability of lime-cement solidified sludge with metakaolin[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(4): 1146 1152. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 董辉,程子华,刘禹岐,等.生物酶改良淤泥质土的时效强度试验研究[J].水文地质工程地质,2020,47 (2):84-94. [DONG Hui, CHENG Zihua, LIU Yuqi, et al. Experimental study of aging strength of the mucky soils improved with bio-enzyme[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(2):84-94. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 应舒, 高长胜, 黄家青. 新吹填淤泥地基浅层处理试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2010, 32(12): 1956 1960. [YING Shu, GAO Changsheng, HUANG Jiaqing. Experimental study on surface-layer improvement of soft foundation filled by newly dreged silt[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(12): 1956 1960. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 刘景锦,雷华阳,卢海滨,等.真空预压法淤堵泥层形成机理及预测模型研究[J].水文地质工程地质,2017,44(3):61-71. [LIU Jingjin, LEI Huayang, LU Haibin, et al. A study of siltation mud formation mechanism and prediction model of vacuum preloading method[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017,44(3):61-71. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 龚敦红,陈志芳,祝湛毅,等.浅层动力固结在温州某 软土路基中的试验研究[J].水文地质工程地质,

- 2007, 34(3): 82 84. [GONG Dunhong, CHEN Zhifang, ZHU Zhanyi, et al. Experimental study of shallow dynamic consolidation in a soft soil subgrade in Wenzhou[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2007, 34(3): 82 84. (in Chinese)]
- [7] CAI Y Q, XIE Z W, WANG J, et al. New approach of vacuum preloading with booster prefabricated vertical drains (PVDs) to improve deep marine clay strata[J].

  Canadian Geotechnical Journal, 2018, 55(10): 1359 1371.
- [8] 杨国强, 李宝详. 真空加堆载预压法的大面积应用 [J]. 岩土工程师, 1991, 3(4): 43-49. [YANG Guoqiang, LI Baoxiang. Application of vacuum-surcharge preloading method for soft ground treatment[J]. Geotechnical Engineer, 1991, 3(4): 43-49. (in Chinese)]
- [9] 鲍树峰, 娄炎, 董志良, 等. 新近吹填淤泥地基真空固结失效原因分析及对策[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(7): 1350 1359. [BAO Shufeng, LOU Yan, DONG Zhiliang, et al. Causes and countermeasures for vacuum consolidation failure of newly-dredged mud foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(7): 1350 1359. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 黄鹏华, 王柳江, 刘斯宏, 等. 真空堆载预压联合电渗竖向排水地基非线性固结解析解[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(1): 206 216. [HUANG Penghua, WANG Liujiang, LIU Sihong, et al. Nonlinear analytical solutions for vertical drainage consolidation of foundations under vacuum-surcharge preloading combined with electroosmosis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(1): 206 216. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 占宏, 李晗峰, 翁振奇. 石灰对真空预压加固高含水率淤泥效果影响试验研究 [J]. 地基处理, 2020, 2(3): 192 195. [ ZHAN Hong, LI Hanfeng, WENG Zhenqi. Experimental study on the effect of lime treatment on vacuum preloading to strengthen high water content muck [J]. Chinese Journal of Ground Improvement, 2020, 2(3): 192 195. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 蒲诃夫,潘友富, KHOTEJA Dibangar,等. 絮凝-水平真空两段式脱水法处理高含水率疏浚淤泥模型试验研究 [J]. 岩土力学, 2020, 41(5): 1502 1509. [PU Hefu, PAN Youfu, DIBANGAR K, et al. Model test on dewatering of high-water-content dredged slurry by flocculation-horizontal vacuum two-staged method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(5): 1502 1509. (in Chinese with English abstract)]

- [13] 杨爱武,肖敏,周玉明. 石灰粉煤灰固化天津滨海软土试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(1): 60 67. [YANG Aiwu, XIAO Min, ZHOU Yuming. Experimental study on lime-fly ash to cure Tianjin marine soft soil[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(1): 60 67. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 饶春义,朱剑锋, 庹秋水,等. 镁质水泥固化淤泥一维 压缩特性研究 [J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(4): 94-99. [RAO Chunyi, ZHU Jianfeng, TUO Qiushui, et al. A study of the 1D compression characteristics of magnesia cement silt [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(4): 94-99. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 刘松玉,周建,章定文,等. 地基处理技术进展[J]. 土木工程学报, 2020, 53(4): 93 110. [LIU Songyu, ZHOU Jian, ZHANG Dingwen, et al. State of the art of the ground improvement technology in China[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(4): 93 110. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 邓永锋, 赵余, 刘倩雯, 等. 钢渣的硅系与复合系激发及其在软土固化中的应用[J]. 中国公路学报, 2018, 31(11): 11 20. [DENG Yongfeng, ZHAO Yu, LIU Qianwen, et al. Na<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>-and cement-based activation on steel slag and its application in soft-soil stabilization[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(11): 11-20. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 刘松玉, 郑旭, 蔡光华, 等. 活性MgO碳化固化土的抗硫酸盐侵蚀性研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(11): 3057 3064. [LIU Songyu, ZHENG Xu, CAI Guanghua, et al. Study of resistance to sulfate attack of carbonated reactive MgO-stabilized soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(11): 3057 3064. (in Chinese with

#### English abstract)

- [18] 刘松玉, 李晨. 氧化镁活性对碳化固化效果影响研究 [J]. 岩土工程学报, 2015, 37(1): 148-155. [LIU Songyu, LI Chen. Influence of MgO activity on stabilization efficiency of carbonated mixing method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(1): 148-155. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019. [[Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. Standard for geotechnical testing method: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese)]
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基检测技术规范: JGJ 340—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for testing of building foundation soils: JGJ 340—2015[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese)]
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.建筑地基基础设计规范: GB 50007—2011[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for design of building foundation: GB 50007—2011[S]. Beijing: China Planning Press, 2012. (in Chinese)]

编辑:张明霞