

水泥搅拌桩处理泥炭土的固化机理及影响因素研究

冯荣先¹, 钟钙冰¹, 刘亮¹, 梁鉴源¹, 顾美湘^{2*}

(1. 中交四航局第一工程有限公司, 广东 广州 510450; 2. 广州大学 土木工程学院, 广东 广州 510006)

摘要: 马来西亚东海岸铁路项目拟采用水泥搅拌桩加固滨海深厚泥炭土地基, 该工法的关键是确定水泥配合比和添加剂。针对滨海泥炭土有机质含量高、环境酸性强等特点, 开展泥炭土的物理力学试验, 设计并实施多组配合比和影响因素下水泥土室内单轴压缩试验。试验结果表明: 当水灰比从0.5增加到0.9, 平均抗压强度减小了0.35 MPa; 加入矿粉的固化效果较差, 而加入粉煤灰或石膏后效果明显; 加入固化剂后, 7 d强度出现增长, 早期强度平均增加了189.29%; 与普通硅酸盐水泥相比, 抗硫酸盐水泥对泥炭土的固化效果增加了9.5%; 对比软可塑粉质黏土, 该技术对泥炭土的固化效果更佳, 平均抗压强度增加了127%。

关键词: 泥炭土; 水泥搅拌桩; 固化机理; 强度; 影响因素

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

Curing Mechanism and Influencing Factors of Cement Mixing Piles Reinforcing Peat Soil

FENG Rongxian¹, ZHONG Gaibing¹, LIU liang¹, LIANG Jianyuan¹, GU Meixiang^{2*}

(1. The First Engineering Company of CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510450, China;

2. School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou, Guangdong 510006, China)

Abstract: The cement mixing pile is used to reinforce the deep peat soil foundation in Malaysia's east coast railway construction. The key in this project is to determine the cement mix proportion and additives. Considering the high organic matter content and strong environmental acidity of coastal peat soil, physical and mechanical tests of peat soil and laboratory uniaxial compression tests of cement soil under different mix proportions and influencing factors were conducted. Test results show that the mean compressive strength decreases by 0.35 MPa with the increase in cement-water from 0.5 to 0.9. Adding mineral powder gives a relatively poor curing effect while adding fly ash or gypsum contributes an obvious improvement. The curing agent increases the early strength by about 189.29% with strength beginning to increase from 7 d. Compared with ordinary Portland cement, sulfate-resistant cement increases the curing effect on peat soil by 9.5%, and this technique shows a better curing effect on peat soil with an increase of the mean compressive strength by 127% compared with soft plastic silty clay.

Keywords: peat soil; cement mixing pile; curing mechanism; strength; influencing factor

0 引言

水泥搅拌桩是目前加固各种成因饱和软黏土最成熟、最常见的处理方法^[1-4], 常用于淤泥、淤泥质土、

湿陷性黄土等软弱地基的加固^[5-7]。水泥搅拌桩以不同水泥为加固剂, 利用混合设备将其与原位地基土强制混合, 使软土和加固剂发生一系列反应, 减少土中的自由水量, 生成强度较高的水合物, 将软土硬化

收稿日期: 2024-06-10(修改稿)

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 51908150); 广州市科技计划项目(编号: SL2022A04J00985)

作者简介: 冯荣先, 男, 大学本科, 高级工程师. E-mail: frongxian@cccc4.com

*通信作者: 顾美湘, 男, 博士, 讲师. E-mail: mxgu@gzhu.edu.cn

为具有一定强度的优质地基,以满足上部建筑物的支撑力及变形要求^[8-10]。滨海相软土地形成的水泥土加固体自形成起即受到腐蚀介质的侵蚀^[11],特别是当存在泥炭土这类由腐殖质和矿物质组成的特殊土时,由于泥炭土具有高含水率、孔隙比、压缩性、流变性和有机质含量以及低强度等特点^[12-14],与其他软土有显著区别,存在比较明显的强度衰减、渗透性增大等劣化现象,其固化机理和影响因素较普通软黏土地基更为复杂,值得进一步深入研究^[15-18]。马来西亚东海岸铁路项目所在地区的地质情况较差,且富含泥炭土,为了工程的安全开展,保证工程质量,需要对现场泥炭土性质进行分析,为后续设计和施工提供参考。因此,本文基于马来西亚东海岸铁路项目,对滨海泥炭土腐蚀场地的侵蚀特征进行调查,原位开挖现场土样,开展泥炭土的物理性质试验,实施多组配合比和影响因素下水泥土室内单轴压缩试验,系统研究滨海相场地形成的水泥土固化机理及影响因素。

1 工程概况及工程地质条件

1.1 工程概况

马来西亚东海岸铁路项目位于西马来西亚半岛,沿线软基处置长度超过200 km,滨海区域泥炭土层广泛分布,厚度主要集中在10~20 m,局部厚度达到40 m。泥炭土层中有机质含量高、厚度不均匀且存在夹层,地质条件复杂。通过设计综合比对,拟采用深层水泥搅拌桩法处置泥炭土地基。为确定不同地质条件和处理深度的水泥搅拌桩施工参数及处理效果,选取5个分部试桩段落,现场原位开挖代表性土样,进行泥炭土的物理力学试验和室内配比试验,为设计和施工提供相关技术参数。

1.2 泥炭土的物理性质试验

原位取样后,开展表层腐殖土及淤泥质粉质黏土的有机物含量测试以及淤泥质粉质黏土的液限及塑限测试,结果如表1所示。对于有机质含量大于10%的泥炭土,对应的pH值为5~6,呈酸性。

2 固化机理

泥炭土主要成分是有机质(如植物残体、腐殖质、微生物等)和其他无机成分(如矿物质、水分和空

表1 土的物理性质

Table 1 Physical properties of soil

桩号	深度/m	土类	有机质含量/%	液限/%	塑限/%	塑性指数	pH值
CH217+898	0~5.3、 8.4~9.4	弱泥炭质土	10.4	80	23	57	6
CH222+851	0~14.8	弱泥炭质土	10.3	62	36	26	6
CH222+851	15.8~26.5	粉质黏土	—	78	41	37	—
CH221+289	12.2~15.2	淤泥质粉质黏土	4.8	58	35	23	7
CH222+659	0~10.9	弱泥炭质土	11.2	83	42	41	5

气等)。其中,植物残体是最主要的有机成分,经过分解作用后,形成了腐殖质^[19],腐殖质含有丰富的有机物质(如蛋白质、糖类、脂肪等),泥炭土中的矿物质主要来自土壤中的沉积物和降解的岩石(如硅酸盐、钾、钙、镁、铁等)。

水泥水解和水化反应、黏粒与水化物反应(包括离子交换、团粒化作用及凝硬反应)和碳酸化反应这3个过程是水泥土固化过程中主要发生的。生成物主要有氢氧化钙 $[Ca(OH)_2]$ 、硅酸钙水化物(C—S—H)、铝酸钙水化物(C—A—H)、铁铝酸钙水化物(C—A—F)及碳酸钙 $(CaCO_3)$ 等。

2.1 水泥的水解和水化反应

水泥颗粒与水分子相互作用,发生一系列化学反应,通过和水反应形成具有胶结作用的化学键并与其他离子物理交联并固化,再通过与硅酸盐等进行水化反应生成其他必要物质,最终形成硬化混凝土。

2.2 黏土颗粒与水泥水化物的作用

水泥搅拌桩的黏粒与水泥水化物之间形成物理交联,同时,黏土颗粒作为辅助,可以催化水泥水化作用,且黏土颗粒具有吸附能力,具有分散均匀并促进早期水化反应的效果。相互作用增强了水泥搅拌桩强度和耐久性,提高其抗裂性能、抗渗能力、耐久性和承载能力^[20]。

2.3 碳酸作用

水泥与土搅拌混合过程中,水泥和含有二氧化碳的空气发生碳酸化反应,会释放钙离子从而降低pH值,有腐蚀作用,还会产生二氧化碳气泡导致空隙率增加。碳酸化会分解水泥中主要生成的硅酸钙,导致材料强度等性能下降,对结构承载能力造成影响。

3 不同影响因素和配合比的试验研究

3.1 试验方案及方法

制备水泥土试样前,先对土样进行预处理。首先去除土中杂质,混合后加入一定量海水,其中海水中主要无机盐的质量分数为 Cl^- (19.10 g/kg)、 Na^+ (10.62 g/kg)、 SO_4^{2-} (2.66 g/kg)、 Mg^{2+} (1.28 g/kg)、 Ca^{2+} (0.40 g/kg)和 K^+ (0.38 g/kg),然后使用混合搅拌机进行搅拌,将含水率调至液限。然后,取出调制后的适量土样与水泥及外加剂搅拌形成水泥土后立即放入试验室进行养护(图1)。水泥土试样的直径为25 mm,高度为75 mm。不同试验组的养护时间分别为7 d、14 d、28 d和56 d。对达到养护时间的试样实施单轴压缩试验,相同配合比进行3~4组平行试验,以提高试验结果准确度。

为研究水泥搅拌桩处理泥炭土的固化机理及影响因素,选择水灰比、水泥掺量、外加剂、水泥种类和土的种类5个因素进行分析,不同工况描述见表2。



图1 水泥土试样和单轴压缩试验

Figure 1 Cement-soil sample and axial compressive tests

表2 工况描述

Table 2 Description of operation condition

影响因素	工况描述
水灰比	0.5、0.9
水泥掺量	无添加、加矿粉、加粉煤灰和加石膏4个工况
外加剂	减水剂、固化剂
水泥种类	普通硅酸盐水泥(OPC)、抗硫酸盐水泥(SRC)
土的种类	软可塑粉质黏土、泥炭土

3.2 水灰比的影响

选取桩号CH217+898的弱泥炭土,水泥掺量为24%,无外加剂,采用普通硅酸盐水泥,在水灰比为0.5和0.9时,不同龄期试件的抗压强度测试结果如图2所示。

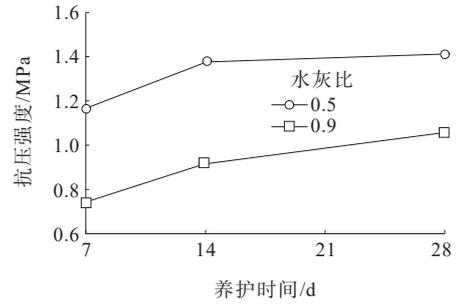


图2 不同水灰比对水泥土强度的影响

Figure 2 Variation of cement-soil strength under different water-cement ratios

由图2可知:对于水灰比为0.5的水泥土,随着养护时间的增加,其强度增长缓慢,而水灰比为0.9时,其强度随养护时间的增加而增加。总体上,两种水灰比加固下的强度经过28 d的养护时间均有所增长,水灰比为0.5和0.9的平均抗压强度分别为1.41 MPa和1.06 MPa。水灰比的增加对水泥土的平均抗压强度有不利影响,当水灰比从0.5增加到0.9后,28 d养护时间下的水泥土平均强度降低了24.82%。

3.3 水泥掺量的影响

选取弱泥炭质土,无外加剂,采用普通硅酸盐水泥,在水灰比为0.5时,不同水泥掺量下试样的抗压强度结果如下。

(1) 研究水泥掺量是总掺量的100%时,不同水泥掺量(25%、30%、35%和40%)对强度的影响。

图3为不同水泥掺量对泥炭土强度的影响变化曲线(只含水泥,不含矿粉)。

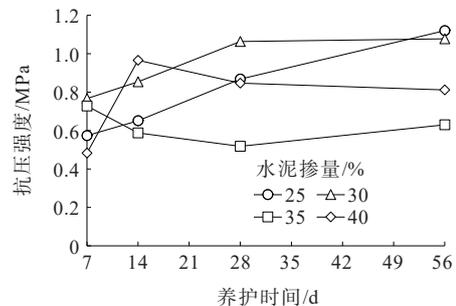


图3 不同水泥掺量对泥炭土强度的影响

Figure 3 Variation of cement-soil strength under different cement content

由图3可知:随着水泥掺量的增加,其强度呈现增长或下降两种不同变化规律。掺量为25%和30%时,水泥土的抗压强度随养护时间的增长而增加。

而掺量为35%和40%时,抗压强度随养护时间的增加有下降的现象。对于掺量为25%、30%、35%和40%的水泥土,56 d抗压强度比28 d抗压强度分别增加了29.0%、1.3%、21.6%和-4.1%。可以看出,对于滨海泥炭土,30%的水泥掺量是增加水泥土抗压强度的最优掺量。

(2) 加入矿粉后 $[m(\text{水泥}):m(\text{矿粉})=9:1]$,不同水泥掺量(25%、30%、35%和40%)对强度的影响。

图4为加入矿粉后不同水泥掺量对泥炭土强度的影响变化曲线。

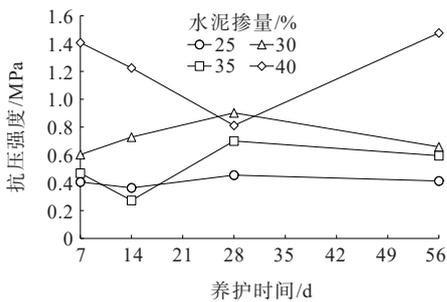


图4 加入矿粉后不同水泥掺量对泥炭土强度的影响变化曲线
Figure 4 Variation of cement-soil strength under different cement content after addition of mineral powder

由图4可知:随着水泥掺量的增加,其强度同样呈现增长或下降两种不同变化规律。掺量为25%时,随着养护时间增加,水泥土强度变化较小,56 d的强度仅增加了0.007 MPa。掺量为35%的水泥土抗压强度随养护时间的变化与掺量为25%的相似,但该水泥土到达56 d养护时间后,强度增加了0.130 MPa。掺量为30%时,水泥土随着养护时间增加,其抗压强度先增加后减小,到达56 d养护时间时,其抗压强度仅仅增加了0.056 MPa,而对于掺量有40%的水泥土抗压强度随养护时间的变化与掺量为30%的相反,最终抗压强度仅增加0.070 MPa。对于掺量为25%、30%、35%和40%的水泥土,56 d抗压强度比28 d抗压强度分别增加了-9.2%、-27.1%、-15.0%和81.9%。可以看出:25%~35%水泥掺量时,加入矿粉后水泥土的抗压强度在前期有所增长,28 d后有减小,而在40%水泥掺量下的水泥土,加入矿粉后出现相反趋势,28 d后强度增长。

(3) 加入粉煤灰后 $[m(\text{水泥}):m(\text{粉煤灰})=9:1]$,不同水泥掺量(30%、35%和40%)对强度的影响。

图5为加入粉煤灰后不同水泥掺量对泥炭土强度的影响变化曲线。

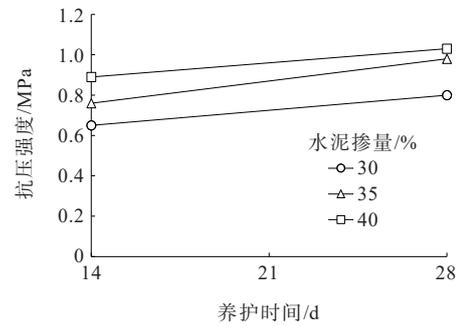


图5 加入粉煤灰后不同水泥掺量对泥炭土强度的影响变化曲线

Figure 5 Variation of cement-soil strength under different cement content after addition of fly ash

由图5可知:加入粉煤灰后,随养护时间的增加,水泥土的抗压强度不断增长。同时,随着水泥掺量的增加,其强度不断增长。掺量为40%的水泥土在不同的养护时间的抗压强度表现较好,平均强度从0.89增加到1.03 MPa。与未加粉煤灰相比,加入粉煤灰之后,28 d后的强度得到了增长,从0.81增加到1.03 MPa。加入粉煤灰具有减水作用,可减少需水量,提高密实性、流动性和塑性,考虑到泥炭土中含水量较大,粉煤灰对泥炭土强度影响较小。以30%水泥掺量为例,与没有加入粉煤灰相比,加入粉煤灰后14 d和28 d的水泥土强度降低24%~25%。

(4) 加入石膏后 $[m(\text{水泥}):m(\text{石膏})=6:4]$,不同水泥掺量(30%、35%和40%)对强度的影响。

图6为加入石膏后不同水泥掺量对泥炭土强度的影响变化曲线。

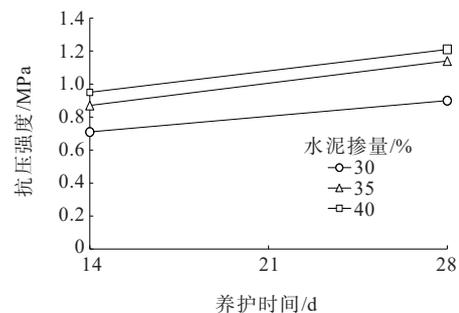


图6 加入石膏后不同水泥掺量对泥炭土强度的影响变化曲线

Figure 6 Variation of cement-soil strength under different cement content after addition of gypsum

由图6可知:加入石膏后,随养护时间的增加,水泥土的抗压强度不断增长。随着掺量的增加,其强度不断增长。掺量为40%的水泥土在不同的养护时间的强度表现较好,平均强度出现增长趋势,从0.95增加到1.21 MPa。与未加石膏相比,加入石膏之后,水泥土在28 d后的强度得到了增长,从0.81增加到1.21 MPa。

3.4 外加剂的影响

采用水泥类型为OPC52.5且水灰比为0.35,研究不同外加剂(固化剂和减水剂)对泥炭土强度的影响。图7为不同外加剂在不同养护期龄对泥炭土强度影响的变化曲线。

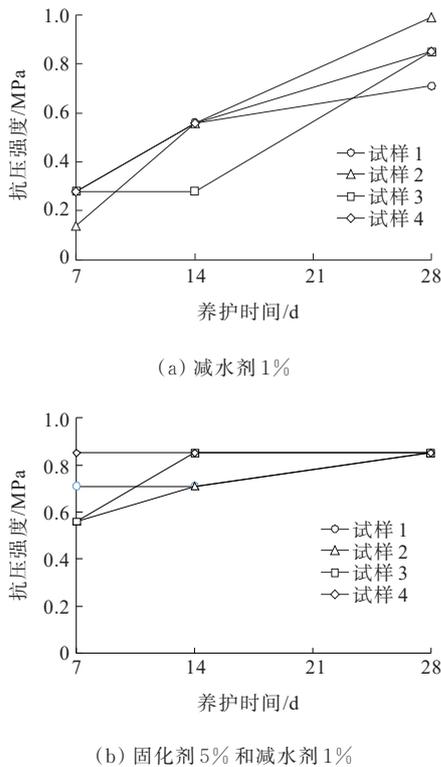


图7 不同外加剂对泥炭土强度的影响
Figure 7 Variation of cement-soil strength under different additives

由图7可知:当加入5%的固化剂后,加固效果显著,14 d强度基本已经稳定,而没有加固剂的组,其强度随养护时间的增加而增加,28 d后,其强度仍可继续增长。28 d养护时间时的水泥土的平均抗压强度为0.85 MPa。与不加固剂的相比,加入固化剂后,7 d强度出现增长,早期强度平均增加了189.29%。

3.5 水泥种类的影响

图8为泥炭土在不同水泥类型(16%掺量)加固

下的强度变化曲线。材料条件为:OPC52.5和0.5的水灰比。

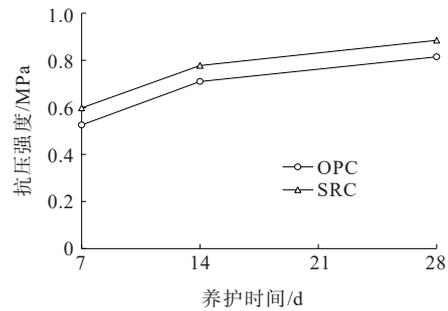


图8 泥炭土在不同水泥类型(16%掺量)加固下的强度变化
Figure 8 Variation of peat soil strength under different cements (cement content of 16%)

由图8可知:普通硅酸盐水泥(OPC)和抗硫酸盐水泥(SRC)加固下的泥炭土,其强度随着养护时间的增加而增长。养护时间从7 d增加到28 d时,普通硅酸盐水泥和抗硫酸盐水泥加固的泥炭土强度分别增长48.12%和55.24%。普通硅酸盐水泥和抗硫酸盐水泥加固的泥炭土的平均强度分别为0.68 MPa和0.75 MPa。由于泥炭土的有机质含量较高,对土有腐蚀效果。与普通硅酸盐水泥相比,抗硫酸盐水泥对泥炭土的固化效果增加了9.5%。

3.6 土的类型的影响

图9为水泥掺量为16%时不同土质的水泥土强度变化情况。材料条件为:OPC52.5和0.5的水灰比。

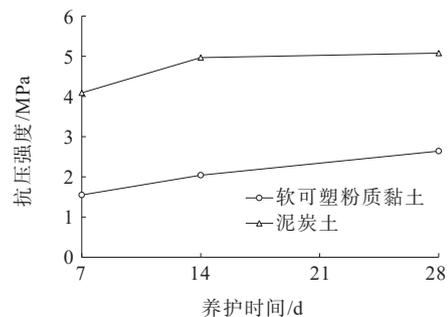


图9 不同土质的水泥土强度变化曲线
Figure 9 Variation of cement-soil strength under different soil properties

由图9可知:①对于软可塑粉质黏土,7 d、14 d和28 d养护时间的强度分别为1.55 MPa、2.04 MPa和2.64 MPa;对于泥炭土,7 d、14 d和28 d养护时间的强度分别为4.09 MPa、4.97 MPa和5.08 MPa。与软可塑粉质黏土相比,泥炭土的平均抗压强度增加了

127%。在养护期间,环境中腐蚀离子会作用于水泥土,养护时间越长,水泥土被侵蚀的时间越长;②对于软可塑粉质黏土,其抗压强度稳步增长,曲线斜率基本不变。而对于泥炭土,在14 d养护时间之后,强度增长速率明显下降,这是因为泥炭土中所含有机物含量较高,腐蚀性较强所导致。水泥土的强度衰减与环境中侵蚀性离子密切相关,未来需要进一步研究^[21]。

4 结论

针对滨海泥炭土有机质含量高、环境酸性强等特点,开展泥炭土的物理力学试验,设计并实施多组配合比和影响因素下水泥土室内单轴压缩试验。得出如下主要结论:

(1) 水灰比的增加对水泥土的平均抗压强度有不利影响,当水灰比从0.5增加到0.9后,平均抗压强度减小了0.35 MPa且28 d养护时间下的水泥土平均强度降低了24.82%。

(2) 30%的水泥掺量对水泥土的平均抗压强度增长最明显。加入矿粉在增加水泥土抗压强度方面较差,而加入粉煤灰或石膏效果明显。固化剂对水泥土的早期强度具有明显作用,早期强度平均增加了189.29%。

(3) 与普通硅酸盐水泥相比,抗硫酸盐水泥对泥炭土的固化效果增加了9.5%。与软可塑粉质黏土相比,该技术对泥炭土的固化效果更佳,平均抗压强度增加了127%。

(4) 采用水泥搅拌桩加固泥炭土地基时应考虑不同因素的影响,注意有机质和环境酸性物质,结合现场施工特点,重视并长期监测水泥土强度衰减过程,为该类型地基处治工法选取、设计和施工提供重要参考依据。

参考文献:

References:

- [1] 王艳萍,孙庆楠,陈昊若.美标水泥搅拌桩设计方法研究[J].中外公路,2022,42(5):19-24.
WANG Yanping, SUN Qingnan, CHEN Haoruo. Study on design method of American standard cement mixing pile[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(5): 19-24.
- [2] 龙晓鹏.水泥土搅拌桩复合地基承载特性分析[D].长沙:长沙理工大学,2020.
LONG Xiaopeng. Analysis of bearing characteristics of cement-soil mixing pile composite foundation[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2020.
- [3] 翟春林.水泥搅拌桩在高铁软土路基施工中的应用[J].江西建材,2022(7):246-248.
ZHAI Chunlin. Application of cement mixing pile treatment soft soil subgrade technology in high-speed rail construction[J]. Jiangxi Building Materials, 2022(7): 246-248.
- [4] 赵青华.深层水泥搅拌桩在软土路基加固处理中的应用[J].交通世界,2022(29):115-117.
ZHAO Qinghua. Application of deep cement mixing pile in soft soil subgrade reinforcement[J]. Transpo World, 2022(29): 115-117.
- [5] LU X H, SONG M G, WANG P F. Numerical simulation of the composite foundation of cement soil mixing piles using FLAC3D[J]. Cluster Computing, 2019, 22(4): 7965-7974.
- [6] 赖夏蕾.深厚软基悬浮水泥土搅拌桩复合地基沉降研究[D].福州:福州大学,2017.
LAI Xialei. Study on settlement of floating cement-soil piles composite foundation[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2017.
- [7] 曹支才,王光辉.不同因素对水泥搅拌桩强度影响的试验研究[J].中外公路,2020,40(3):283-287.
CAO Zhicai, WANG Guanghui. Experimental study on the influence of different factors on the strength of cement mixing pile[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(3): 283-287.
- [8] 秦世伟,陆小锋,张国军.水泥土搅拌法加固淤泥质黏土的试验研究[J].中外公路,2019,39(5):256-260.
QIN Shiwei, LU Xiaofeng, ZHANG Guojun. Experimental study on mucky clay strengthened by cement-soil mixed method[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2019, 39(5): 256-260.
- [9] 张兴宇,薛丹璇,郝东旭,等.道路地基处理技术研究综述[J].城市道桥与防洪,2020(11):31-33,10.
ZHANG Xingyu, XUE Danxuan, HAO Dongxu, et al. Research summary of road foundation treatment technology[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2020(11): 31-33, 10.
- [10] 韩斌武,李振强.近海软基地区水泥搅拌桩施工工艺与质量控制[J].绿色科技,2022,24(10):277-280.
HAN Binwu, LI Zhenqiang. Construction technology and quality control of cement mixing pile in offshore soft base area[J]. Journal of Green Science and Technology, 2022, 24(10): 277-280.
- [11] 匡一成,杨铠波,尹平保,等.吹填人工岛软基处理及围堰变形监测分析[J].中外公路,2023,43(6):21-26.
KUANG Yicheng, YANG Kaibo, YIN Pingbao, et al. Cofferdam deformation monitoring and soft foundation

- treatment for hydraulic reclamation artificial island[J]. Journal of China & Foreign Highway,2023,43(6):21-26.
- [12] 张帆舸,黄昌富,姚铁军,等.泥炭土压缩及回弹变形规律试验研究[J].岩土工程学报,2021,43(增刊2):259-262.
ZHANG Fange, Huang Changfu, Yao Tiejun, et al. Experimental study on compression and rebound deformation of peat soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2021,43(sup 2):259-262.
- [13] 桂跃,刘锐,赵振兴,等.高分解度泥炭土-土水特征曲线研究[J].防灾减灾工程学报,2021,41(3):622-628.
GUI Yue, LIU Rui, ZHAO Zhenxing, et al. Study on soil water characteristic curve of peaty soil with high degree of decomposition[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering,2021,41(3):622-628.
- [14] 王竟宇,王志良,申林方,等.单向压缩状态下滇池泥炭土的蠕变特性研究[J].地下空间与工程学报,2020,16(6):1689-1695,1704.
WANG Jingyu, WANG Zhiliang, SHEN Linfang, et al. Study on consolidation creep properties of Dianchi peaty soil under one-dimensional compression[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16 (6):1689-1695,1704.
- [15] 张振豪.云南泥炭土固结机理研究[D].北京:北京交通大学,2021.
ZHANG Zhenhao. Study on consolidation mechanism of peat soil in Yunnan[D].Beijing:Beijing Jiaotong University, 2021.
- [16] 付佰勇,师启龙.深层水泥搅拌桩承载特性研究进展分析[J].中国港湾建设,2021,41(4):29-31,76.
FU Baiyong, SHI Qilong. Research progress of bearing characteristics of deep cement mixing pile[J]. China Harbour Engineering,2021,41(4):29-31,76.
- [17] 梁伟,屈俊童,刘超,等.改良滇池泥炭质土的固化剂配比研究[J].低温建筑技术,2021,43(11):54-58.
LIANG Wei, QU Juntong, LIU Chao, et al. Study on the proportion of solidifying agent for improving peat soil in Dianchi lake[J].Low Temperature Architecture Technology, 2021,43(11):54-58.
- [18] 夏梓涵,梁云超.泥炭质软土路基CFG桩地基处理技术分析[J].运输经理世界,2021(28):14-16.
XIA Zihan, LIANG Yunchao. Analysis of CFG pile foundation treatment technology for peat soft soil subgrade[J].Transport Manager World,2021(28):14-16.
- [19] 曹净,孔程,李松坡.腐殖酸对泥炭土强度的影响及其机理分析[J].安全与环境学报,2022,22(5):2493-2499.
CAO Jing, KONG Cheng, LI Songpo. Effect of humic acid on strength of peat soil and its mechanism analysis[J]. Journal of Safety and Environment,2022,22(5):2493-2499.
- [20] 张怀鹏.水泥搅拌桩在昆明地铁泥炭质土中的应用研究[D].成都:西南交通大学,2019.
ZHANG Huaipeng. Study on application of cement mixing pile in peat soil of Kunming subway[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University,2019.
- [21] 闫楠,杨俊杰,刘强,等.海水环境下水泥土强度衰减过程室内试验研究[J].土木工程学报,2017,50(11):115-124.
YAN Nan, YANG Junjie, LIU Qiang, et al. Laboratory test on strength deterioration process of soil cement in seawater environment[J].China Civil Engineering Journal, 2017,50(11):115-124.