

深厚软土既有素混凝土桩复合地基道路 受相邻真空预压影响研究

王健¹, 陈仕文^{2*}, 梁东波³

(1. 珠海航空城工程建设有限公司, 广东 珠海 519042; 2. 珠海市规划设计研究院, 广东 珠海 519001;
3. 珠海建工控股集团有限公司, 广东 珠海 519090)

摘要: 基于塑性硬化土(HS)模型进行仿真分析,研究了从复合地基施工到路侧真空预压不同阶段素混凝土桩复合地基的应力与变形特征,并建立了对策模型,以近场地处理一侧边桩的水平位移和弯矩作为影响控制效果的评价指标,提出了降低影响的建议。结果表明,HS模型能够区分加卸载时刚度的差异,并较好的反映了淤泥的应力应变关系特性;真空预压处理引起加固区外围土体发生侧向卸荷,最大水平位移发生在密封墙边缘。真空预压场地处理会引起近场地一侧边桩的侧摩阻力和轴向力显著增大,摩阻力零点的下移;抽真空时,负孔压先集中在排水板处,然后向土中扩散,渗透性大的土层负压传递较快;增大场地处理边缘距路基距离或者在复合地基边缘设置地下连续墙均能有效减小边桩的侧向变形和弯矩,而水泥土搅拌桩及其格栅墙的支护效果很有限。

关键词: 地基处理; 深厚软土; 素混凝土桩; HS模型; 复合地基; 真空预压

中图分类号: TU447

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2022)06-0530-07

Influence of vacuum preloading on existing plain concrete pile composite foundation road in deep soft soil area

WANG Jian¹, CHEN Shi-wen^{2*}, LIANG Dong-bo³

(1. Zhuhai Aviation City Engineering Construction Co., Ltd., Zhuhai 519042, Guangdong, China;
2. Zhuhai Institute of Urban Planning & Design, Zhuhai 519001, Guangdong, China;
3. Zhuhai Construction Engineering Holding Group Co., Ltd., Zhuhai 519090, Guangdong, China)

Abstract: Based on the numerical simulation of the plastic hardening soil (HS) model, the stress and deformation characteristics of the plain concrete pile composite foundation at different stages from the construction of the composite foundation to the vacuum preloading of the roadside were studied. The countermeasure model was established, and the horizontal displacement and bending moment of the piles on the side of the near the site treatment were used as the evaluation indexes to control the effect, and the suggestions for reducing the influence were put forward. The results show that the HS model can distinguish the difference of stiffness between loading and unloading, and better reflect the stress-strain relationship characteristics of silt. Vacuum preloading treatment causes lateral unloading of the soil around the soil reinforcement area, and the maximum horizontal displacement occurred at the edge of the sealing wall. The treatment of vacuum preloading site significantly increased the lateral friction resistance and axial force of the pile near the site treatment, and the zero point of friction resistance moved downward. When vacuuming, the negative pore pressure was first concentrated at the drainage board, and then diffused into the soil. The negative pore pressure in the soil with high permeability transmitted faster. Increasing the distance between the site treatment edge and the roadbed or setting up high-pressure jetting piles on the edge of the composite foundation can effectively reduce the lateral deformation and bending moment of the side piles, while the support effect of cement-soil mixing piles and grid-typed cement-soil walls was very limited.

Key words: foundation treatment; deep soft soil; plain concrete pile; HS model; composite foundation; vacuum preloading

收稿日期: 2021-11-23

作者简介: 王健(1982—),男,广东揭阳人,硕士,工程师,主要从事工程项目管理研究。E-mail: wang33662021@126.com。

*通信作者: 陈仕文(1989—),男,湖北襄阳人,硕士,工程师,主要从事岩土工程方面的工作。E-mail: csw2016@hnu.edu.cn。

0 引言

在中国南部沿海城市通过吹填造陆方式获得了可观的建设用地。吹填土及其下覆盖的深厚海相软土具有含水率高、孔隙比大、抗剪强度低、压缩性强、渗透性差、承载力低等特点^[1-2],需要对地基进行处理,以改善其性能。素混凝土桩复合地基由于施工工艺简单、工期短、相对管桩造价更低,被广泛应用在这种区域的道路工程中。真空预压法在我国的应用始于20世纪80年代,广泛应用于我国公路、港口、水利等软基加固工程^[3],是处理吹填超软地基的主要方法^[4]。在这些区域进行开发时多采用先修路再地块建设的模式,路侧地块开发时采用真空预压进行地基处理可能对既有复合地基道路造成不利影响。

尽管周边环境对既有复合地基影响的相关研究已经取得了一定的成果^[5-10],但大多研究针对的都是较为常规的场地条件。在滨海深厚软土区域,素混凝土桩往往无法贯穿深厚软土层而采用悬浮桩设计,容易在路侧真空预压场地处理时产生较大变形并可能超出素混凝土桩的承载能力,既有道路开裂甚至路堤失稳现象时有发生,给道路安全带来潜在的威胁。因此真空预压对深厚软土区素混凝土桩复合地基的影响规律以及如何降低这种影响值得进一步研究。

要准确分析真空预压引起既有复合地基的变形,需要选择合理的土的本构模型。由于真空预压是一个孔隙压力降低、有效应力增大的过程,加固区内的土体发生侧向收缩,而非侧向挤出,并不会出现失稳现象^[11]。然而这种侧向收缩却会导致加固区边缘外的土体发生侧向卸荷。硬化土模型(HS)是一种对软土和硬土均适用的高级本构模型^[12]。该模型一个特点是能区分加荷和卸荷的差异,且其刚度依赖于应力水平,在三轴排水情况下,轴向应变与偏差应力之间呈双曲线关系。该模型在隧道开挖、基坑开挖、挡土墙工程等数值模拟方面影响应用很广泛。

为此,本文依托珠海航空城滨海商务区某市政道路工程,基于能够较好的反应软土应力应变特性的HS模型,研究了真空预压处理对素混凝土桩复合地基影响,获得了场地处理导致的复合地基的变形受力规律,并通过对策模型分析结果,提出了降低影响的建议。

1 工程地质条件及场地处理设计

道路工程位于珠海某新近吹填区,吹填土含砂量较高,吹填土下分布有深厚淤泥软土,呈饱和、流塑状态。场地自上而下分别分为吹填土2.5 m、淤泥20 m、淤泥质土10 m、砂质黏土2.5 m、全风化砂岩4 m。道路地基采用长25 m间距1.6 m的素混凝土桩复合地基,道路北侧地块采用真空预压进行场地处理,道路地基已经完工约2年。真空预压边缘15 m范围内采用15 m长排水板,其余部分采用25 m长排水板,按1 m间距方形布置,膜上覆水深度1 m,场地处理边缘距边桩 $a=10$ m。密封墙由直径0.8 m、宽1.4 m、长16.5 m的双排黏土搅拌桩组成,真空预压设计时间为120 d。

2 计算模型

采用专业有限元软件按照实际设计图纸构建的数值模型如图1所示。桩长25 m,按正三角形布桩,桩间距 $S=1.6$ m,桩径 $D=0.4$ m,桩进入淤泥质土层2.5 m,呈悬浮态。模型左右边界约束侧向位移,底部边界同时约束水平和竖向位移。路侧真空预压区宽度超过100 m,取一部分建模。模型左侧和底部设置为不允许渗流,其余边界允许渗流,处理地下水位-0.5 m,膜下真空压力-85 kPa。

单位: m

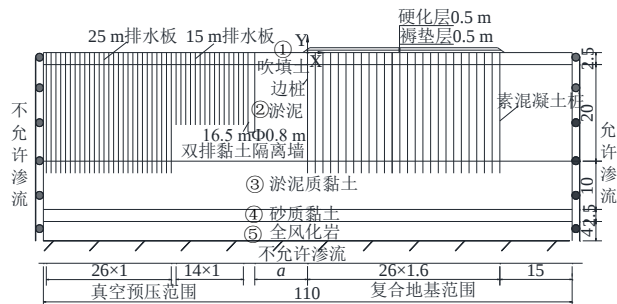


图1 模型示意图

Fig. 1 Diagram of model

2.1 材料参数

参数的标定方法参考了文献^[13-14],其中强度参数 φ' 和 c' 、参考割线刚度 E_{50}^{ref} 以及破坏比 R_f 均采用三轴固结排水试验确定, ψ 、 p^{ref} 、 V_{ur} 和 m 以及 E_{50}^{ref} 、 E_{eod}^{ref} 与 E_{ur} 之间的相互关系根据参考文献的经验值取值确定。此处仅列出具有代表性的淤泥三轴试验实测值与HS理论模型的应力应变曲线对比如图2所示。

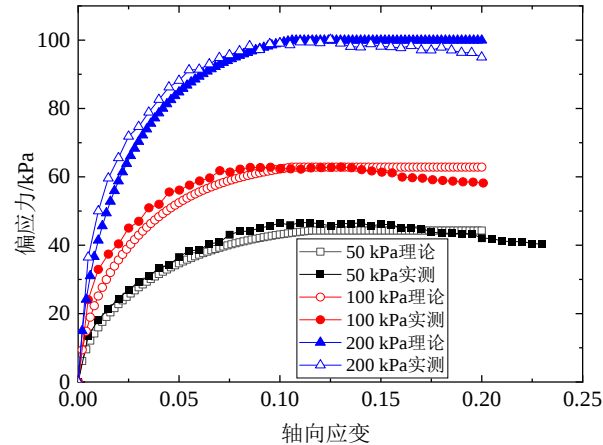


图 2 淤泥的应力应变关系
Fig. 2 Stress-strain curves of silt

图 2 中可以看出淤泥的应力应变关系呈现显著的应变硬化特征,当轴向应变超过 10%后,呈现出一定的应力软化的特征。实测与理论曲线对比可

知,该模型较好反映了淤泥的应力应变关系特性。本模型中采用土层参数如表 1 所示,为简化模型,设置水平渗透系数和竖向渗透系数相同,密封墙是在黏土中添加膨润土制成,渗透系数为 4.32×10^{-5} m/d,密封墙的其余参数取与各层土相同。褥垫层双层土工格栅采用 geogrid 单元模拟,轴向刚度取 $J=5\,000$ kN/m。素混凝土桩采用 embedded beam 来模拟,排水板采用 drain 单元模拟,设置负压-85 kPa。

2.2 施工过程模拟

施工过程的模拟通过在不同阶段改变边界条件或激活不同单元的方式来实现。设置地应力平衡(0 d)、施工复合地基(30 d)、施工路堤(30 d)、固结(2年)、真空加载(10 d)、满载预压(110 d)6个分析步,计算模式为流固耦合分析。

表 1 材料参数
Table 1 Material parameters

土类型	$\gamma_{\text{unsat}}/$ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	$\gamma_{\text{sat}}/$ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	e_{ini}	$E_{50}^{\text{ref}}/$ MPa	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}/$ MPa	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/$ MPa	$P_{\text{ref}}/$ kPa	m	R_f	$\varphi'/$ ($^{\circ}$)	$\psi/$ ($^{\circ}$)	$c'/$ kPa	$k/$ ($\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$)
吹填土	20.3	20.7	0.50	6.0	6.0	18.0	100	0.50	0.90	32.0	0	2.0	0.3
淤泥	15.3	15.4	2.00	3.0	3.0	12.0	100	0.75	0.87	11.0	0	8.0	7.8×10^{-4}
淤泥质黏土	16.5	16.8	1.40	3.2	3.2	12.8	100	0.70	0.73	9.5	0	11.5	3.3×10^{-3}
砂质黏土	18.7	19.5	0.75	5.0	5.0	15.0	100	0.60	0.95	30.8	7	20.2	5.5×10^{-3}

注:表中参数从左向右依次为:非饱和重度、饱和重度、初始孔隙比、标准三轴排水试验割线刚度、侧限压缩试验切线刚度、卸载再加载刚度、参考应力、刚度的应力相关幂指数、破坏比、有效摩擦角、剪胀角、有效黏聚力和渗透系数^[13]。

3 结果分析

3.1 整体变形

如图3所示,真空预压处理后加固区发生最大沉降1.66 m,占淤泥层厚度的7.2%。沉降主要发生在排水板长度范围内,而排水板下方沉降量很小。模型的变形以沉降为主,加固区中心基本不发生水平位移,水平位移主要集中在密封墙内边缘,最大达到0.63 m。密封墙处这种大变形可能造成真空预压过程中密封墙出现开裂,从而使密封效果降低。因此,建议场地处理边缘采用内侧黏土密封墙,外侧水泥土搅拌桩或钢筋混凝土的多层隔离措施。

3.2 地下水头

图4分别为抽真空5 d、10 d和满载预压110 d后的地下水头 h 分布图。地下水头与竖向坐标及水压力 p_{water} 的关系如下式:

$$h=z-p_{\text{water}}=z-(p_{\text{excess}}+p_{\text{active}}) \tag{1}$$

式中: p_{excess} 和 p_{active} 分别代表超静孔隙水压力和静水压力; z 代表位置水头。

当真空加载负孔压逐步增加到85 kPa时,淤泥和淤泥质土层的负孔压先集中在排水板附近,然后向土层扩散。经过110 d满载预压后,排水板范围土体的地下水头均已达到-8.5 m。而吹填土由于其渗透性大,真空预压5 d内负孔压就传递到整个土层。在密封墙的作用下,负孔压被限制在加固区范围内,减少了真空预压区外路基范围的固结沉降。

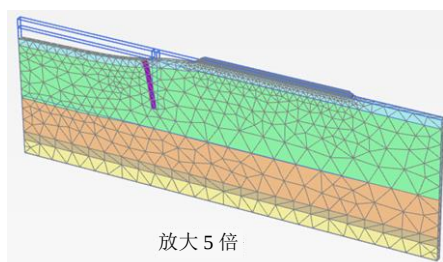
3.3 素混凝土桩受力分析

图 5 为近场地处理一侧边桩的侧摩阻力及轴向力图。经过 2 年的固结,桩侧产生负摩阻力,摩阻力零点在桩的中部-12.5 m 处,经过真空固结后桩间土继续固结下沉,负摩阻力增大,且零点下移至-17.5 m 处。

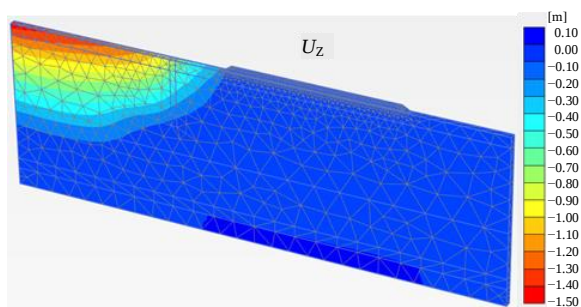
桩施工后固结 2 年,桩中的最大轴力 68.07 kN,满载预压结束后增大至 111.42 kN,增大了 43.35%。

分布形式上,在零点以上范围轴力随深度不断加大,而零点以下则不断减小,零点处轴力最大。素混凝土按照悬浮桩设计(桩端为淤泥质黏土),桩端土提供的最大端承力 $N_{\text{端max}}=25 \text{ kN}$,在固结过程中达到限值后不会再增加,桩的承载力主要由桩中下部的正侧摩阻力提供。

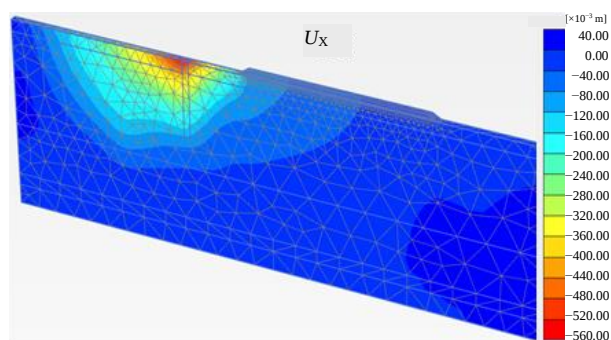
如图6所示,桩施工后固结2年,群桩弯矩呈对称分布,近场地处理一侧和远场地处理一侧桩弯矩较大,群桩中部较小,最大弯矩 $6.7 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。满载预压完成后近真空预压一侧弯矩显著增大,最大弯矩位于桩顶以下 3 m 处,达到 $23.9 \text{ kN}\cdot\text{m}$,桩顶以下 7 m 处存在反弯点。近场地处理一侧的边桩弯矩在中上部和中部均较大,可能最先发生断桩并逐步向群桩中心蔓延,在工程实践中应该采取措施减小边桩弯矩。



(a)



(b)



(c)

图3 网格变形及位移云图

Fig. 3 Grid deformation and displacement contour

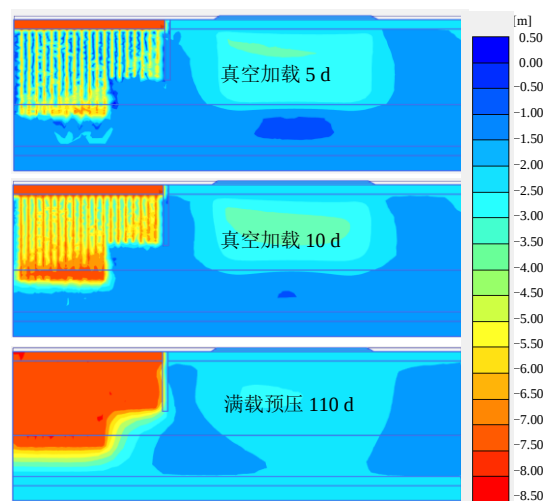
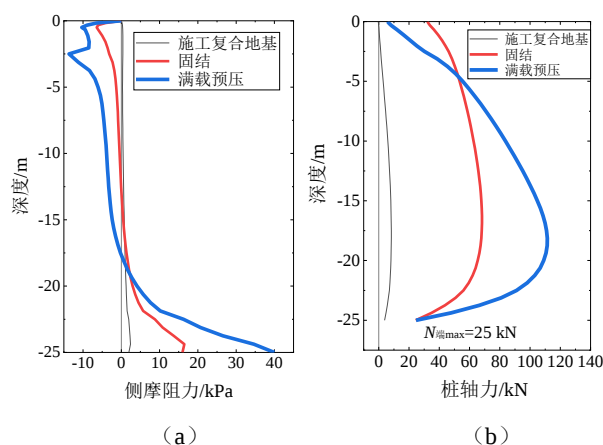


图4 不同阶段地下水头

Fig. 4 Ground water heads at different stages

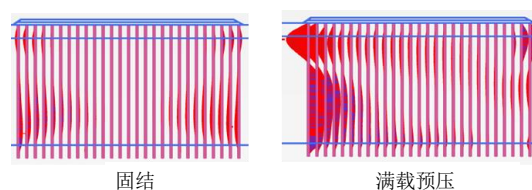


(a)

(b)

图5 边桩侧摩阻力及轴向力分布

Fig. 5 Distribution of side pile lateral friction resistance and axial force



固结

满载预压

图6 桩的弯矩

Fig. 6 Bending moment of pile

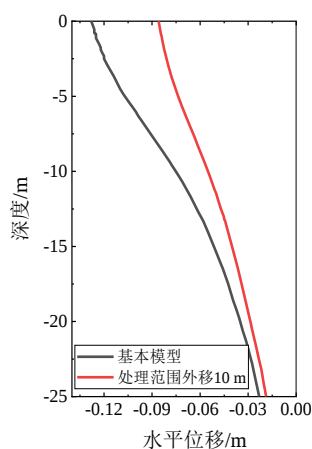
3.4 降低影响的对策模型分析

通过改进前述基本模型构建对策模型,以近场地处理一侧边桩的水平位移 u_x 和弯矩 M 为评价指标,分析增大场地处理边缘距路基距离和在路基侧设置支护两种对策对降低路基影响的效果。位移值取真空预压产生的净值,即真空加载(10 d)分析步之前的位移进行清零。

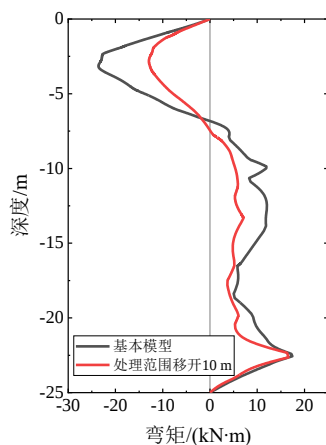
(1) 对策一:增大场地处理边缘距路基距离

如图7所示,将真空预压场地处理边缘距路基距离 a (图1) 从 10 m 增大到 20 m , $u_{x\text{max}}$ 、 M_{max}

分别减小 32.8%和 45.6%。因此,尽量增大真空预压场地边界距既有路基的距离,是减小对复合地基影响的有效手段。



(a)



(b)

图7 边桩水平位移和弯矩(对策一)

Fig. 7 Horizontal displacement and bending moment of side pile (countermeasure 1)

(2) 对策二: 复合地基边缘设置支护

如图8所示,考虑三类支护形式,材料采用弹性模型,水泥土的变形参数按照文献^[15]水泥土的试验结果取值,地下连续墙按照 $E=30\text{ GPa}$, $\mu=0.2$ 取值。

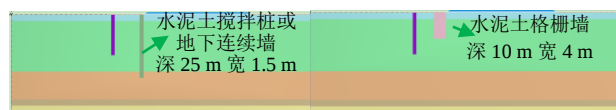


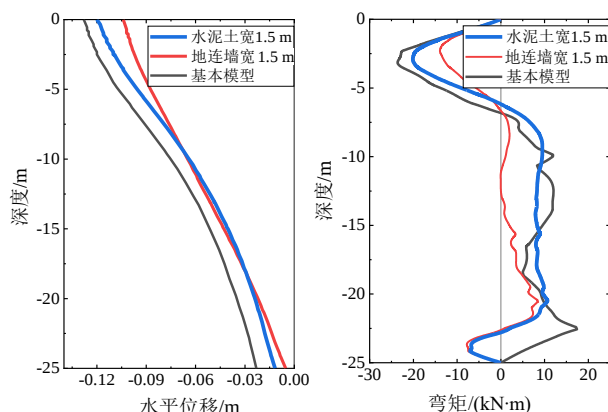
图8 加强路侧支护工况

Fig. 8 Strengthening roadside support conditions

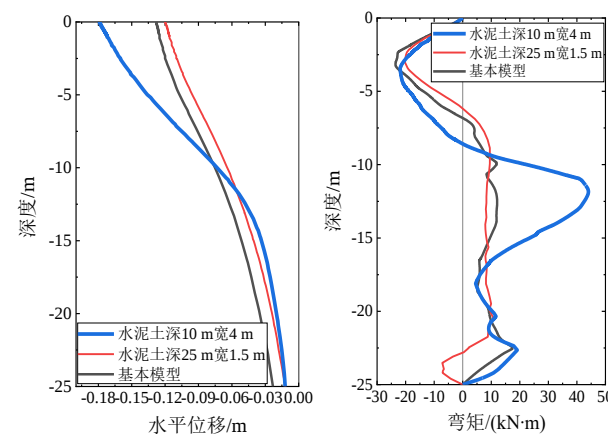
如图9(a)所示,地下连续墙由于刚度较大,侧向变形呈近似线性,且边桩的弯矩显著降低,水泥土支护时对降低边桩侧向位移和弯矩也有一定的作用。与没有支护相比,水泥土搅拌桩和地下连

续墙分别使边桩的水平位移减小 6.2%和 23.1%,弯矩分别减小 15.2%和 41.8%。

图9(b)可知,深10m宽4m水泥格栅墙和深25m宽1m双排水泥土桩对土体的加固体积相近,但后者效果显著好于前者。水泥土格栅墙支护时,边桩的侧向位移和弯矩比后者更大,格栅墙底部2m处边桩弯矩最大,为基本模型的2.3倍。这可能与格栅墙相比原有软土层重度更大,引起附加荷载有关,且由于格栅墙深度浅,在墙底缺乏约束的位置,边桩的弯矩迅速发展达到最大。



(a)



(b)

图9 边桩水平位移和弯矩(对策二)

Fig. 9 Horizontal displacement and bending moment of side pile (countermeasure 2)

对比以上两种对策,增大场地处理边缘距路基距离可以同时控制复合地基的侧向位移和群桩弯矩,而在复合地基边缘设置支护则对支护结构材料和布置有要求。对于深厚软土地基,刚度强度更大的高压旋喷桩的支护效果明显比水泥土搅拌桩更好,水泥土搅拌桩及其格栅墙的支护效果有限。

4 结论

本文结合珠海深厚软土素混凝土桩复合地基

工程实例,建立了有限元模型,研究了真空预压处理对既有素混凝土桩复合地基的影响,并分析了两种影响控制对策有效性,得到以下主要结论:

(1) 真空预压处理引起土加固区外围土体发生侧向卸荷,最大水平位移发生在密封墙边缘。

(2) 真空预压场地处理会引起近场地处理一侧边桩的侧摩阻力和轴向力显著增大,摩阻力零点下移。

(3) 抽真空时,负孔压先集中在排水板处,然后向土中扩散,渗透性大的土层负压传递较快。

(4) 增大场地处理边缘距路基距离或者在复合地基边缘设置高压旋喷桩均能有效减小边桩的侧向变形和弯矩,而水泥土搅拌桩及其格栅墙的支护效果很有限。

参考文献

- [1] 林奕禧,艾康洪,黄良机. 珠海地区软土的工程特性及工程建设问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊2): 3372-3376.
LIN Yi-xi, AI Kang-hong, HUANG Liang-ji. Issues of engineering characteristics and engineering construction of soft clay in Zhuhai region[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S2): 3372-3376.
- [2] 李栋,唐昌意,黄伟洪,等. 滨海超深软土刚性桩复合地基工作性能研究[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(1): 255-262.
LI Dong, TANG Chang-yi, HUANG Wei-hong, et al. Study on working characteristics of rigid pile composite foundation in coastal super-deep soft soil area[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(1): 255-262.
- [3] 刘汉龙,赵明华. 地基处理研究进展[J]. 土木工程学报, 2016, 49(1): 96-115.
LIU Han-long, ZHAO Ming-hua. Research progress of foundation treatment[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(1): 96-115.
- [4] 李明东,潘耀森,郎钞棚,等. 真空预压法处理吹填超软地基 10 a 进展及展望[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(1): 15-22.
LI Ming-dong, PAN Yao-sen, LANG Chao-peng, et al. Progress and prospect of vacuum preloading method in treating hydraulic reclamation super soft foundation for 10 years[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(1): 15-22.
- [5] 张景尧,乔京生,梁乐杰. 土体侧向位移对周边复合地基力学性状影响研究[J]. 土工基础, 2013, 27(3): 89-92.
ZHANG Jing-yao, QIAO Jing-sheng, LIANG Le-jie. Study on the influence of soil lateral displacement on the mechanical properties of surrounding composite foundation[J]. Soil Engineering and Foundation, 2013, 27(3): 89-92.
- [6] 崔新壮,龚晓南,李术才,等. 盐水环境下水泥土桩劣化效应及其对道路复合地基沉降的影响[J]. 中国公路学报, 2015, 28(5): 66-76, 86.
CUI Xin-zhuang, GONG Xiao-nan, LI Shu-cai, et al. Deterioration effect of cement soil pile in saline environment and its influence on settlement of road composite foundation[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(5): 66-76, 86.
- [7] 卢萍珍,于东晖,方云飞,等. CFG 桩复合地基增强体偏位影响分析[J]. 建筑结构, 2014, 44(20): 126-129, 104.
LU Ping-zhen, YU Dong-hui, FANG Yun-fei, et al. Influence analysis of reinforcement displacement of CFG pile composite foundation[J]. Building Structure, 2014, 44(20): 126-129, 104.
- [8] 苗云东,夏力农,陆玮,等. 地基土沉降对在役复合地基性状影响的模型试验研究[J]. 建筑结构, 2013, 43(12): 81-84.
MIAO Yun-dong, XIA Li-nong, LU Wei, et al. Model test study on the influence of foundation soil settlement on the behavior of in-service composite foundation[J]. Building Structure, 2013, 43(12): 81-84.
- [9] 王乾坤,徐国宾,王传宏. 水域水位变化对邻近复合地基支承路堤稳定性的影响研究[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(1): 216-220.
WANG Qian-kun, XU Guo-bin, WANG Chuan-hong. Study on the influence of water level change on the stability of adjacent composite foundation supported embankment[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2020, 31(1): 216-220.
- [10] 李连祥,季相凯,刘嘉典,等. 复合地基侧向开挖上覆荷载影响规律离心机试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(增刊1): 153-156.
LI Lian-xiang, JI Xiang-kai, LIU Jia-dian, et al. Centrifuge test study on the influence law of overburden load on lateral excavation of composite foundation[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(S1): 153-156.

