

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230805001

板墙组合式软土固化地基沉降特性与设计 参数优化*

朱敏捷¹, 蔡勇², 周晋杭¹, 李建华¹, 于洋³

(1. 国网浙江省电力有限公司台州供电公司, 浙江台州 318000; 2. 国网浙江省电力有限公司, 浙江杭州 310000;
3. 浙江大学海洋学院, 浙江舟山 316021)

摘要: 软土固化是近年来开始广泛使用的地基处理方法之一, 如何综合考虑安全性和工程造价, 实现固化土地基的优化设计是工程中普遍关注的问题。本研究以浙江省台州市经纬 110 kV 滨海变电站场地为研究对象, 提出适用于变电站场地荷载特性的板墙组合式固化地基处理方式, 通过现场勘察与室内实验, 测定典型软土和固化土物理力学参数, 建立场地三维数值模型, 计算不同板墙组合方案对应的工后沉降与孔隙水压力变化规律, 分析板墙组合式固化地基处理方式在控制沉降方面的优势。在分析地基沉降演变过程基础上, 以控制地基沉降和固化成本为优化目标, 确定板墙组合式固化地基的最优设计参数为固化剂掺量 4.5%, 固化板厚度 3.0 m, 固化墙厚度 2.0 m, 深度 7.0 m。研究发现固化剂掺量的增加, 显著增加了固化土单轴抗压强度与抗剪强度, 但最大沉降值几乎不受固化剂掺量影响。固化墙通过限制下伏软土的侧向变形, 减小了超静孔隙水压力消散速率和地基工后沉降变形速率。

关键词: 软土地基; 固化土; 变电站; 数值模拟; 优化

中图分类号: TU447 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)05-1149-09

Settlement Characteristics and Design Parameters Optimization of Composite Panel-Wall Solidified Soft Soil Foundations

ZHU Minjie¹, CAI Yong², ZHOU Jinhang¹, LI Jianhua¹, YU Yang³

(1. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Taizhou Power Supply Company, Taizhou 318000, China;
2. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310000, China;
3. Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China)

Abstract: Soft soil solidification has become a widely used foundation treatment method in recent years. A key engineering challenge is how to optimize the design of solidified soil foundation by balancing safety and project cost. This study focused on the site of the Jingwei 110 kV Binhai Substation in Taizhou, Zhejiang Province, and proposed a panel-wall composite solidified foundation treatment method suitable for the load characteristics of the site. Through field investigation and laboratory experiments, the physical and mechanical parameters of typical soft soil and solidified soil were measured. A three-dimensional numerical model of the site was then established to calculate the variation patterns of post-construction settlement and pore water pressure under different panel-wall combina-

* 收稿日期: 2023-08-05; 修回日期: 2023-08-22

基金项目: 国家电网依托工程科技项目(11CJ01)、浙江省自然科学基金项目(LY21D020001)资助

作者简介: 朱敏捷(1972—), 男, 高级工程师。主要从事电力系统规划设计研究。E-mail: 1035754960@qq.com

通信作者: 于洋(1986—), 男, 副教授, 博导, 博士。主要从事岩土工程防灾减灾研究。E-mail: yang-yu@zju.edu.cn

tions. The advantages of the panel-wall composite solidification method in controlling settlement were also analyzed. Based on an analysis of the settlement evolution process, the optimal design parameters for panel-wall composite solidified foundation were determined, with the curing agent content at 4.5%, panel thickness at 3.0 m, wall thickness at 2.0 m, and wall depth at 7.0 m. The study found that increasing the curing agent content significantly enhanced the uniaxial compressive strength and shear strength of the solidified soil, but the maximum settlement was hardly affected by the agent content. The solidified wall limited the lateral deformation of the underlying soft soil, reducing the dissipation rate of excess pore water pressure and the post-construction settlement rate of the foundation.

Keywords: soft soil foundation; solidified soil; transformer station; numerical simulation; optimization

0 引言

软土在东南沿海地区分布广泛,具有压缩性大、承载力低的工程特性。对于软土地基,必须开展有效的地基处理工作,以避免基础因变形过大而导致建筑物破坏甚至倒塌的严重灾害。尽管水泥搅拌桩、碎石土换填等传统方法在软土地基处理方面已取得显著成效,但在节能减排、保护环境背景下,软土地基固化处理方法在工程中得到越来越广泛的应用。如何充分、有效地发挥固化土在提升承载力、减少沉降方面的优势,同时控制固化成本,是目前的研究热点,对保障软土地基及其上部建筑物安全、推广固化土地基处理方法具有重要的科学价值和工程意义。

在工程实践中,水泥是最常用的固化剂之一^[1-2]。为提升固化剂的环境友好性、实现资源二次利用,N.J.Jiang等^[3]和张顶飞等^[4]分别将电石渣和粉煤灰—电石渣作为固化剂,实现了对软土的有效固化;刘青云等^[5]发现钢渣复合型材料可有效提升软土强度;王东星等^[6]发现MgO—粉煤灰对黄土的固化效果优于水泥。针对不同类型软土,高分子和离子固化剂的优势逐渐显现^[7-8],同时促进了商用固化剂的发展。为揭示固化土力学性能的影响因素,基于室内实验,徐杨等^[9]研究了干湿循环对固化土强度的弱化规律;吴晓翔等^[10]建立了固化土无侧限抗压强度与养护龄期的对数关系;钟石明等^[11]系统分析了矿渣、硅酸钠、氯化钙掺量和龄期变化对固化土无侧限抗压强度的影响规律。为揭示固化土力学指标与实际固化效果的关系,朱霖等^[12]基于十字板剪切和静力触探数据,证实了原位固化地基的可行性和有效性;沈政等^[13]对原位固化土的含水率、强度以及地基承载

力进行系统测试,发现可通过规范方法或拟合方程校核固化地基承载力。与换填垫层相似,固化土层通过增加应力扩散角提升软土地基承载力^[14]。不同于换填垫层的是,固化土具有可模性,能够形成不同的空间形状。X.Q.Liu等^[15]通过局部加深固化土处理深度,形成穿过地基潜在滑裂面的固化墙,并实验证明这种板墙组合式固化土地基能有效提升承载力。基于二维数值模拟方法,刘曦^[16]和王玉梅^[17]从应力分布的角度,分别研究了板墙组合式地基的承载力与变形特征。然而,对于无法简化为二维模型的小尺寸场地,板墙组合固化土地基为三维空间结构,不能沿用基于二维模型的研究结果,亟需开展针对性研究,并提出便于应用的设计与优化方法。

本文以板墙组合式固化土地基为研究对象,依托浙江台州地区典型滨海软土固化工程,探究板墙组合式固化土地基的沉降特征,并提出综合考虑固化成本和沉降控制的固化土地基设计优化方法,为固化土工程设计提供理论依据与方法支撑。

1 工程概况

1.1 地质条件

经纬110 kV变电站位于浙江省台州市东南角,主要为海积平原,地势平坦,场地原为海塘。拟建变电站场地长106 m,宽56 m,地面标高在3.0~4.5 m左右(1985国家高程基准),其平面布置如图1(a)所示。场地中部66 m×25 m的区域为主厂房位置,主厂房外侧为站内道路,场地四周布置预制围墙。根据钻孔(图1(a)所示位置)勘察结果,得到场地典型地层剖面如图1(b)~(c)所示,自上而下分

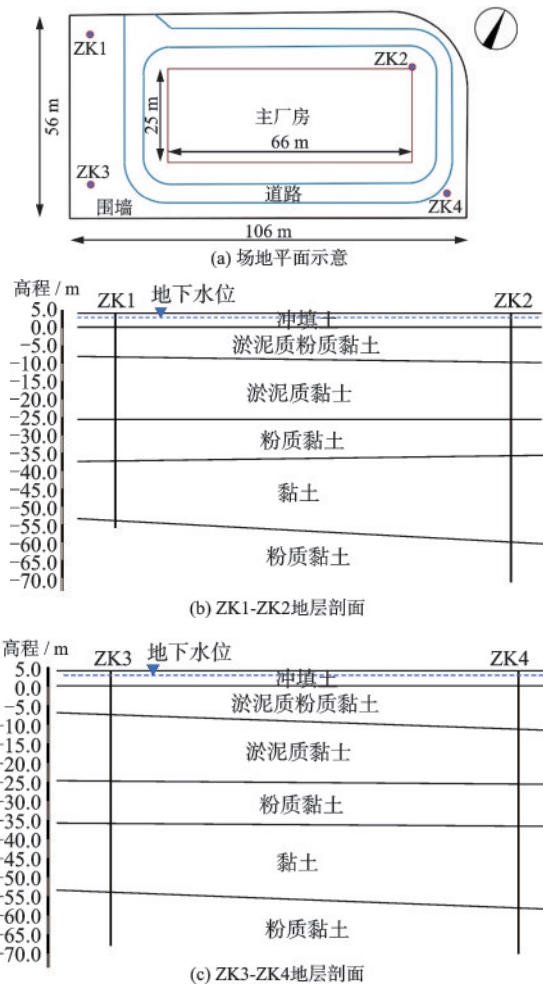


图1 场地平面布置与地层剖面示意

Fig.1 Plan view of site layout and stratigraphic profile

别为冲填土、淤泥质粉质黏土、淤泥质黏土、粉质黏土、黏土和粉质黏土。根据地质勘察报告,地下水位在地表以下2.0 m处,各层土体的物理力学参数见表1,由地层分布和各层土体物理力学参数可知,场地30 m以浅地层主要以淤泥质地层为主,压缩性大,抗剪强度低,是典型的不良地基。

1.2 地基处理方案

为确保变电站主厂房安全,采用桩基础提升地基承载力并控制沉降。主厂房范围以外的场地(图2中内侧与外侧固化墙之间的范围),主要承受均匀铺设的碎石荷载、道路荷载和预制围墙荷载。碎石荷载大小约为5 kPa,道路材料及其上覆荷载约为40 kPa。预制围墙墙体厚度为350 mm,墙体面荷载为65 kPa,可以计算得到围墙产生的线荷载为22.75 kN/m。鉴于上述三种荷载较小,拟采用原位固化方式对图2内侧与外侧固化墙之间的场地进行地基处理,以承受碎

表1 土体物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soils

地层	重度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	压缩模 量/MPa	黏聚 力/kPa	摩擦角/ ($^{\circ}$)	渗透系数/ ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)
冲填土	17.3	2.6	12.3	10.2	1.18×10^{-5}
淤泥质 粉质黏土	17.7	3.0	13.7	12.1	8.47×10^{-6}
淤泥质 黏土	17.0	2.3	12.1	9.5	5.26×10^{-6}
粉质 黏土	17.9	3.4	22.3	13.3	9.62×10^{-6}
黏土	17.7	3.4	24.4	13.3	6.47×10^{-6}
粉质 黏土	19.2	5.8	36.5	18.0	7.33×10^{-6}

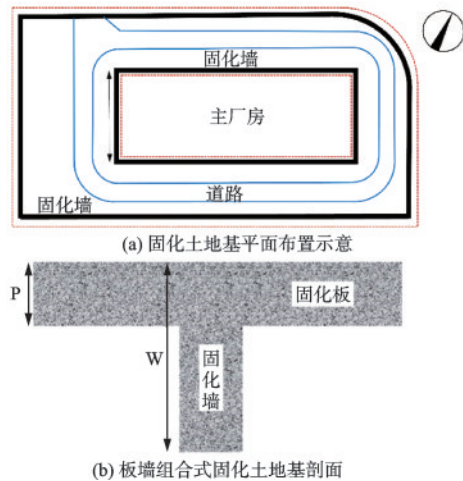


图2 板墙组合式地基处理示意

Fig.2 Schematic diagram of panel-wall composite foundation treatment

石荷载、道路荷载和预制围墙荷载。

在传统板式固化土地基处理方式基础上,考虑场地均布荷载与线荷载组合作用特征,在围墙下部以及主厂房周围增加固化墙,形成板墙组合式固化土地基。外侧固化墙有效控制围墙不均匀沉降的同时,限制固化板下伏软土的侧向变形。内侧固化墙布置于变电站厂房周围,减少下伏软土侧向变形对桩基础的影响。固化墙与固化板剖面如图2(b)所示,图中P为固化板厚度,W为固化墙深度。考虑施工机械能够处理的最大深度,固化板的厚度P分别取3.0、4.0、5.0 m,固化墙的深度W分别为5.0、6.0、7.0、8.0 m,墙体厚度保持为2.0 m不变。因此,不同固化板厚度P和固化墙深度W组成12种板墙组合固化方案,每种方案采用固化板厚度和固化墙

深度表示,如P3W5表示板厚为3.0 m、墙深为5.0 m的方案。

2 板墙组合式固化土地基沉降计算方法

控制地基的工后沉降是本场地固化土地基处理的主要目标。目前尚无成熟的板墙组合式固化土地基工后沉降计算方法,本文基于勘察获得的地层数据,采用Plaxis3D建立数值模型,计算不同板墙组合式固化土地基处理方案的工后沉降。

2.1 数值模型

数值模型如图3所示,模型x方向长306 m,y方向宽156 m,z方向深120 m。根据图1所示4个钻孔揭露的地层分布情况,插值获得模型各地层三维模型,各土层均采用理想弹塑性模型,服从Mohr-Coulomb破坏准则,采用表1所示参数作为模型输入参数。根据不同板墙组合式固化土地基处理方案,模型共划分超过69 000个单元和106 000个节点。

在模型场地范围表面施加荷载,其中墙体荷载通过线荷载模拟,大小为22.75 kN/m,碎石荷载和道路为均布荷载,大小分别为5 kPa和40 kPa,作用范围为图2(a)内侧与外侧固化墙之间的土体表面。限制模型底部边界x、y和z三个方向位移,同时限制模型侧面四个边界的法向位移,模型上表面为自由

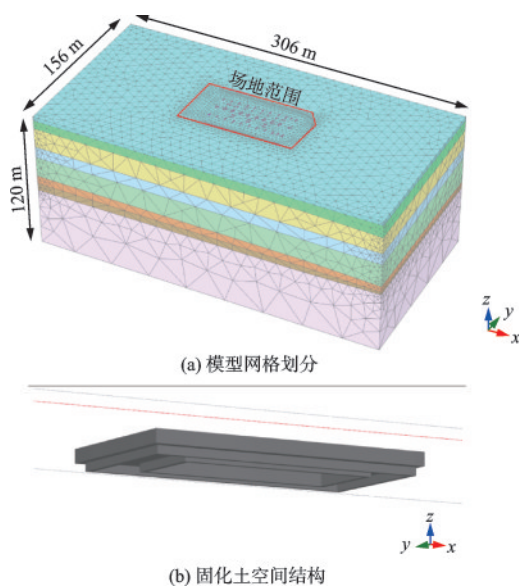


图3 有限元计算模型

Fig.3 Finite element model

边界条件。由于模型边界距场地较远,因此设置地表为排水边界,其他边界为不透水边界。

根据实际施工顺序,模拟步骤如下:

(1) 模型在自重作用下达到初始平衡;

(2) 在固结模式下,激活固化土层,施加面荷载和线荷载,模拟时间为60天;

(3) 在固结模式下,模拟固结度达到90%时,模型的工后沉降与超静孔隙水压力消散过程。

2.2 固化土参数

由于固化土的力学参数、渗透系数与固化剂掺量密切相关。为确定数值模型固化土物理力学参数与渗透系数,取场地地表以下1.0~1.5 m处软土,制作固化剂掺量分别为2.5%、3.5%和4.5%固化土试样。制备试样时,先根据土体质量换算获得固化剂掺量,将固化剂溶液与土体混合搅拌均匀,制成相应试样养护14天。通过固结压缩和直剪实验分别测得压缩模量和抗剪强度参数,通过变水头渗透实验测定渗透系数。

图4所示为不同压力下孔隙比变化曲线($e-p$ 曲线)。由图可见,随着固化剂掺量的增加,固化土的初始孔隙比有所增大,但压缩性降低。由孔隙比可计算压力为100~200 kPa情况下的压缩模量。

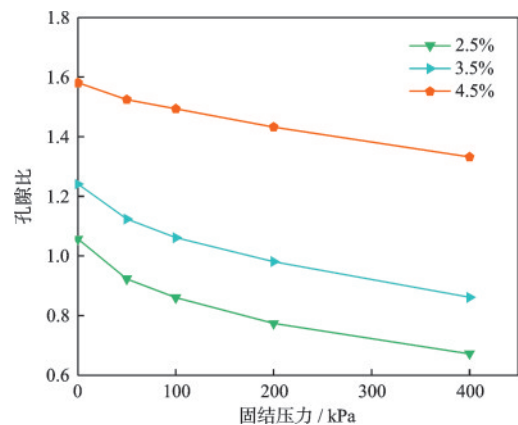


图4 不同固化剂掺量固化土的 $e-p$ 实验曲线

Fig.4 $e-p$ curves of solidified soil with different curing agent contents

图5(a)~(c)所示为法向压力分别为50 kPa和100 kPa时固化土直剪实验曲线,随着固化剂掺量的增加,土体受剪破坏时的剪应力逐渐增大。当固化剂掺量为4.5%时,剪切应力出现明显的峰值和残余强度特征。将法向应力和峰值剪切应力绘于图5(d)中,通过拟合可以得到不同固化剂掺量固化土

的抗剪强度参数。固化土室内实验测试结果汇总于表2中。将表2中的物理力学参数作为Plaxis3D

数值模型中固化土的输入参数,计算板墙组合式固化土地基的工后沉降,并讨论固化剂掺量的影响。

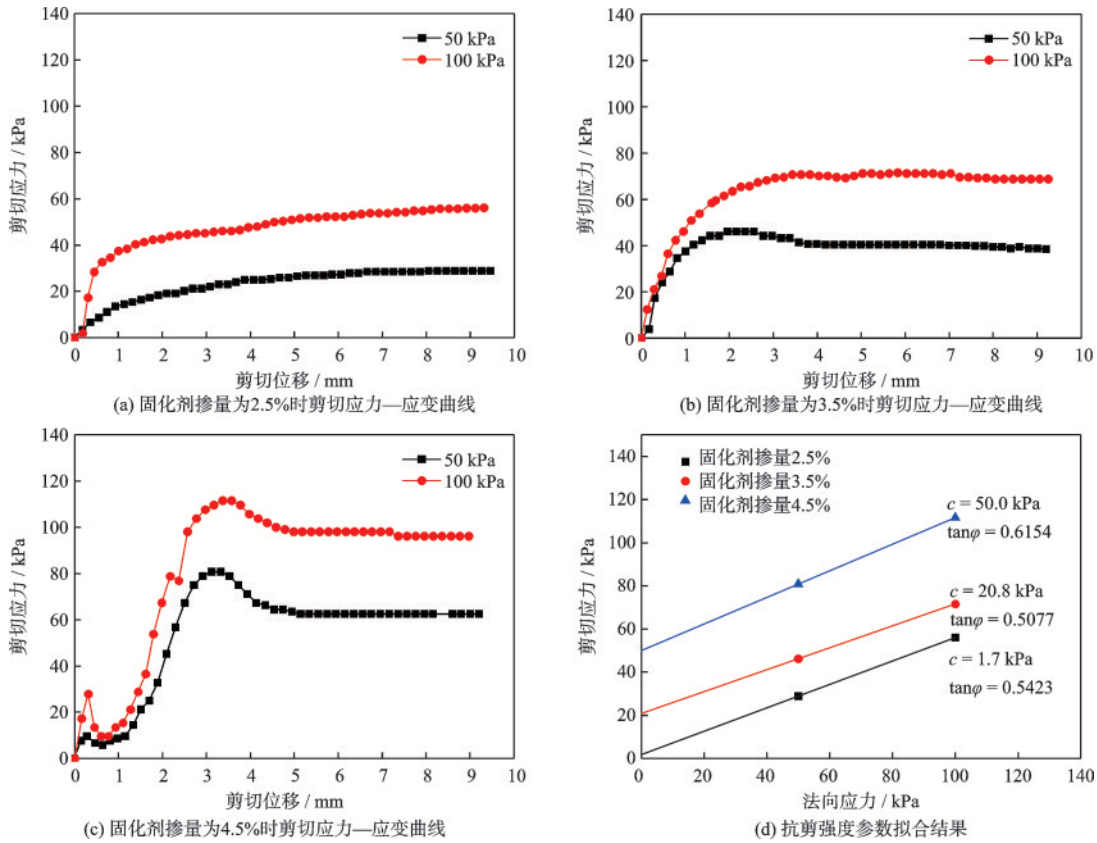


图5 固化土直剪实验曲线与抗剪强度参数

Fig.5 Direct shear experimental curves and shear strength parameters of solidified soil

3 沉降计算结果与固化方案优化

3.1 沉降计算结果

图6所示为软土固结度为90%时,不同板墙组合式固化土地基方案的工后沉降分布云图,参数采用固化剂掺量为4.5%时的固化土参数。由图可见,道路荷载覆盖范围内场地的工后沉降最为明显,在左上角场地入口处,道路荷载覆盖面积最大,工后沉降也最大。由于增加了固化墙,场地四周工后沉降均匀,说明固化墙能有效控制围墙地基的不均匀沉降。针对不同的板墙组合式固化土地基方案,上述沉降分布模式与规律基本一致。从图6中还可看出,相比单纯的板式固化土地基处理方式,板墙组合式固化土地基能显著降低场地工后沉降。例如,当固化板厚度为3.0 m时,在没有固化墙的情况下(P3W3),场地的最大工后沉降为425 mm。当固化

墙深度为5.0 m时(P3W5),最大工后沉降减小为360 mm,且固化墙深度每增加1.0 m,最大工后沉降减少20~40 mm不等。对于板厚为4.0 m和5.0 m的情况,固化墙深度的增加对工后沉降的影响规律与板厚为3.0 m的情况基本一致。

表2 固化土物理力学参数与渗透系数

Table 2 Physical and mechanical parameters and permeability coefficients of solidified soil

固化剂掺量/%	干重度/ $(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	压缩模量/MPa	弹性模量/MPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/°	渗透系数/ $(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$
2.5	13.6	2.77	24.93	1.7	28.5	2.13×10^{-4}
3.5	13.8	3.20	28.80	20.8	26.9	1.76×10^{-4}
4.5	14.0	4.26	38.34	50.0	31.6	1.54×10^{-4}

为揭示场地工后沉降演变过程,取图6中最大工后沉降位置为监测点,绘制其孔隙水压力(地面以下9.0 m处)和沉降(地表位置处)随时间变化曲

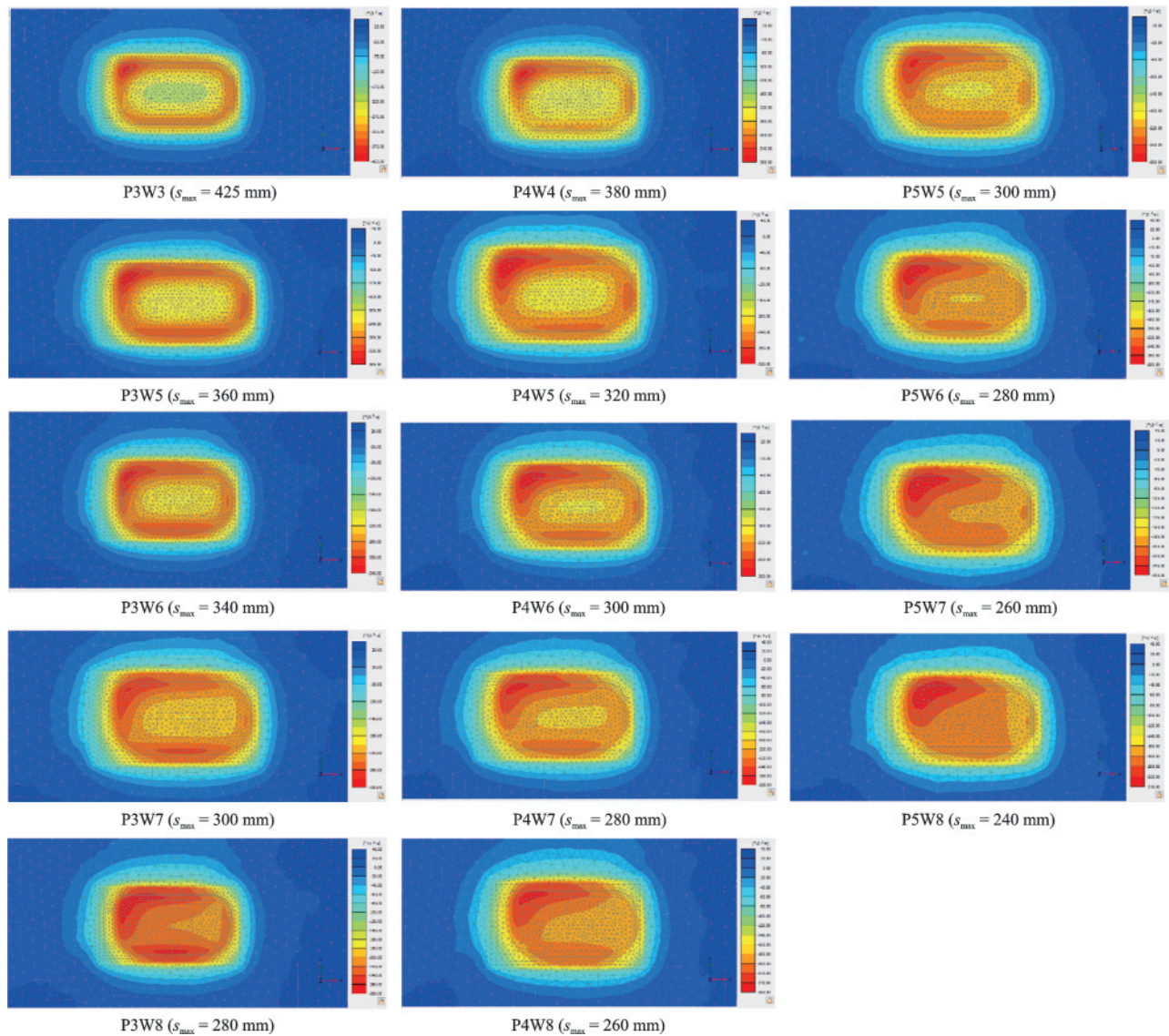


图6 不同固化方案工后沉降分布(s_{\max} 为工后沉降最大值)

Fig. 6 Post-construction settlements under different solidification schemes (s_{\max} is the maximum value of the settlement)

线如图7~图9所示。由图7可见,当固化板厚度为3.0 m时,最大超静孔隙水压力约为11 kPa,随着固

化墙深度的增加,最大超静孔隙水压力逐渐降低。对比图7(a)、图8(a)和图9(a)可见,固化板厚的增

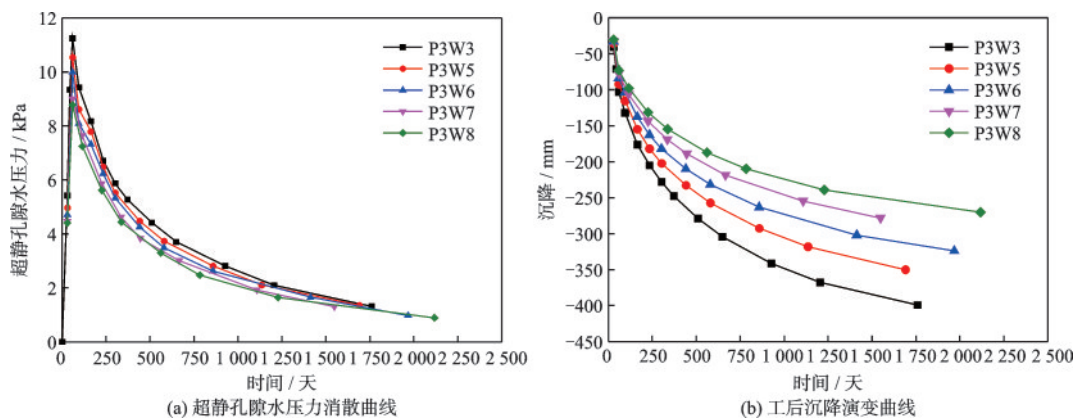


图7 板厚为3 m时孔隙水压力与沉降演变曲线

Fig. 7 Evolution curves of pore water pressure and settlement with a panel thickness of 3 m

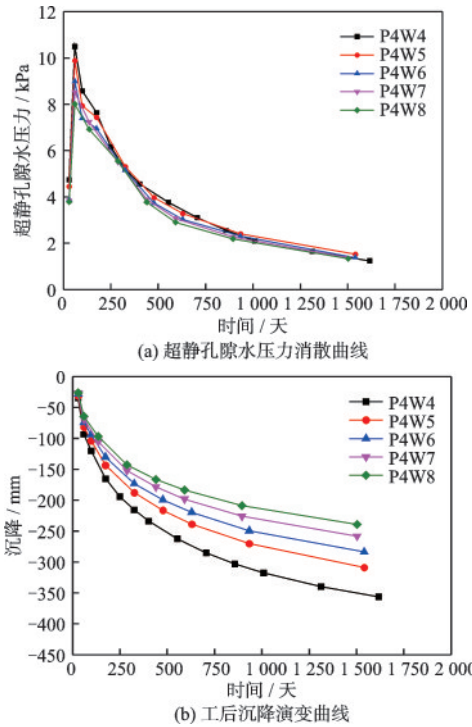


图8 板厚为4 m时孔隙水压力与沉降演变曲线

Fig. 8 Evolution curves of pore water pressure and settlement with a panel thickness of 4 m

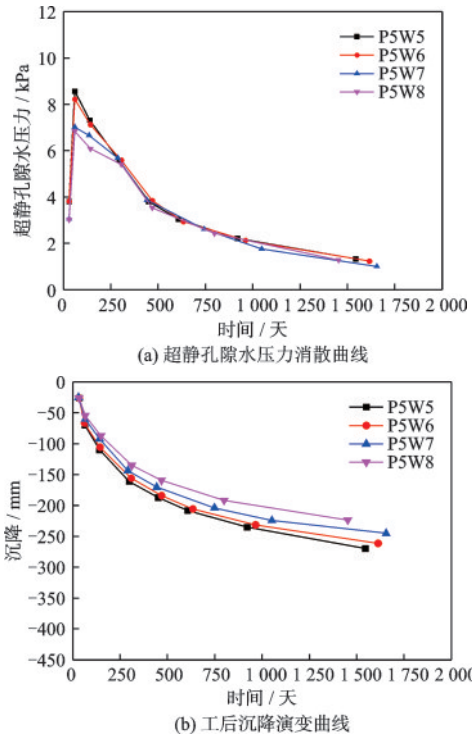


图9 板厚为5 m时孔隙水压力与沉降演变曲线

Fig. 9 Evolution curves of pore water pressure and settlement with a panel thickness of 5 m

加,导致监测点位置处最大超静孔隙水压力降低。超静孔隙水压力较大的方案(如板厚为3.0 m的方案),其超静孔隙水压力消散的时间和工后沉降持

续的时间更久,固化墙深度对超静孔隙水压力消散和工后沉降的影响也更显著(图7)。

对比图7(b)、图8(b)和图9(b)可见,固化墙深度较大时,相同固结时间条件下监测点工后沉降更小,其原因是深度较大的固化墙将荷载传递到较深的土层,使得监测点处的附加应力减小,超静孔隙水压力有所降低。板厚越小(如板厚为3.0 m时),增加固化墙深度对减小工后沉降的效果越显著。随着板厚的增加,固化土自身的压缩变形减小,使得工后沉降值降低。

3.2 板墙组合式固化土地基参数优化

上述工后沉降计算结果表明,固化墙能有效降低场地工后沉降,但增加固化墙深度也意味着固化土方量和相应成本的增加。因此,需要综合考虑固化成本与沉降控制双重因素确定最优的固化方案。固化成本主要由两方面构成,一是固化土的施工处理费用,二是商用固化剂的成本。根据工程前期询价,每立方米固化土的施工处理费用与每千克固化剂成本的比值约为100:0.5,本文采用下式表示固化成本:

$$C = 100V + 0.5S\rho V \quad (1)$$

式中, C 表示固化成本,由于费用采用比值表示,为无量纲量; S 为每立方米土体的固化剂掺量(质量百分比,如2.5%、3.5%和4.5%); ρ 为固化土密度; V 为固化土总方量,为可根据场地固化面积、固化板厚度、固化墙厚度和深度计算。

图10所示为固化剂掺量分别为2.5%、3.5%和4.5%时,不同固化方案的成本与场地固结度达到90%时监测点处工后沉降(后文统称为最大工后沉降)的关系图。由图可见,相同固化方案条件下,固

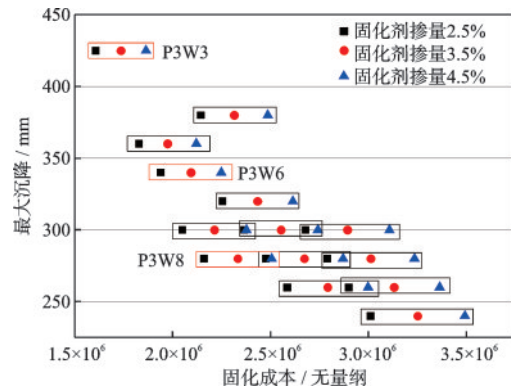


图10 固化成本与最大工后沉降关系

Fig. 10 Relationship between solidification cost and maximum post-construction settlement

固化剂掺量越小,固化成本越低,而场地最大工后沉降值却没有变化。以P3W6方案为例,固化剂掺量分别为2.5%、3.5%和4.5%时,最大沉降均为340 mm,说明固结度达到90%时的最大沉降不受固化剂掺量的影响。因此,仅根据最大工后沉降指标,无法确定固化剂的最优掺量,主要原因是最大工后沉降不能反映超静孔隙水压力的消散过程。图11所示为P3W3、P3W6和P3W8三种方案监测点处沉降随时间变化过程。由图可见,尽管相同方案条件下,不同固化剂掺量对应的最大沉降值相同,但沉降随时间的演变过程却有较大区别。对于相同固化方案,随着固化剂掺量的增加,达到最大工后沉降所需的时间更久。以P3W8为例,固化剂掺量为2.5%、3.5%和4.5%时,达到最大工后沉降的时间分别为1261天、1654天和2118天。说明固化剂掺量的增加,有效延缓了沉降速率。由表2可见,固化剂掺量的增加使得固化土压缩模量增大,固化墙与固化板的整体刚度更高,对固化土下方软土的侧向变形限制作用增强,减缓了土体侧向变形与竖向沉降速率。因此,最优的固化剂掺量为4.5%。

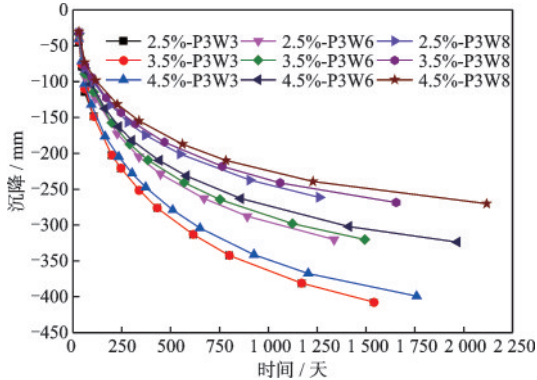


图11 不同固化剂掺量对工后沉降过程的影响(板厚为3 m时)

Fig.11 Influence of different curing agent contents on the settlement evolution process (with a panel thickness of 3 m)

确定了最优固化剂掺量后,需要确定最优的固化土地基设计参数。图12所示为固化剂掺量为4.5%时,不同固化方案的固化成本与最大沉降关系。由图可见,随着固化成本的增加,最大工后沉降值减小,说明固化成本与最大工后沉降为两个矛盾的指标。为综合考虑这两个矛盾的指标,借鉴岩土工程鲁棒性设计思想,确定能够平衡固化成本与

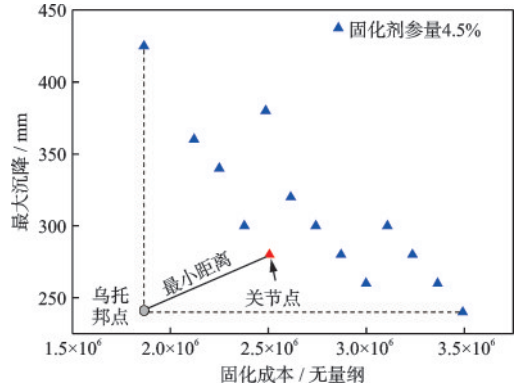


图12 固化土地基设计参数优化结果

Fig.12 Optimization results of design parameters for solidified soil foundation

最大工后沉降的固化土设计参数。

首先确定图中固化成本最低、最大沉降值最小的点(圆形点),该点所对应的方案是不存在的理想方案,称为乌托邦点。其次,将固化成本与最大工后沉降归一化后,按下式计算每个点与乌托邦点的距离 L :

$$L = \sqrt{X_c^2 + X_s^2} \quad (2)$$

式中, X_c 和 X_s 分别为归一化处理后的固化成本和最大沉降,归一化后的乌托邦点为坐标原点。

最后,选取距离最小的固化方案对应的设计参数为平衡固化成本与最大工后沉降的最优设计参数,对应的方案为最优方案(P3W7),即图12中的关节点。因此,确定本工程最优固化土设计参数为:固化剂掺量4.5%,固化板厚度3.0 m,固化墙深度7.0 m、宽度2.0 m。

4 结论

本文针对板墙组合式软土地基固化处理方式,基于固化土物理力学实验数据,建立了真实软土地基的三维数值计算模型,模拟了不同板墙参数组合方案条件下地基沉降过程,揭示了板墙组合式固化土地基处理方法的优越性及其内在机理,综合考虑固化成本与沉降控制因素实现板墙组合式软土地基固化设计参数优化,得到如下主要结论:

(1) 固化土室内实验表明,随着固化剂掺量的增加,固化土的剪切和压缩应力-应变曲线逐渐出现明显的峰值与残余强度特性,固化土的压缩模量、黏聚力和内摩擦角均随固化剂掺量的增加而增大。

(2) 相比传统板式固化土地基处理方式, 固化墙能有效降低工后沉降, 其减小沉降的内在机理是通过限制下伏土体的侧向变形, 减小超静孔隙水压力消散速率和沉降发展速率, 使得相同时间内沉降量值小于传统板式固化地基的沉降值。固化板自身压缩性减小也是工后沉降减少的重要原因。

(3) 固化剂掺量的变化不会改变最终沉降值, 但随着固化剂掺量的增加, 场地达到最终沉降值的时间显著增加, 在板厚相同的前提下, 固化墙的深度越大, 场地达到最终沉降值的延迟效应越显著。

(4) 基于鲁棒性设计原理, 得到本文工程案例固化土地基最优设计参数为: 固化剂掺量 4.5%, 固化板厚度 3.0 m, 固化墙深度 7.0 m、宽度 2.0 m, 为工程实施提供参考。

参考文献:

- [1] 闭东民, 孔纲强, 陈庚, 等. 废弃口罩加筋固化土的强度特性与破坏模式[J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(5): 993-998, 1009.
Bi D M, Kong G Q, Chen G, et al. Strength characteristics and failure mode of solidified soil reinforced by waste masks [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(5): 993-998, 1009. (in Chinese)
- [2] 侯世伟, 张飞, 张皓, 等. 石灰石煅烧煤矸石水泥处理镍污染土的固化特性[J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(5): 986-992.
Hou S W, Zhang F, Zhang H, et al. Solidification characteristics of limestone calcined coal gangue cement for nickel-contaminated soil [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(5): 986-992. (in Chinese)
- [3] Jiang Ningjun, Du Yanjun, Liu Songyu, et al. Multi-scale laboratory evaluation of the physical, mechanical, and microstructural properties of soft highway subgrade soil stabilized with calcium carbide residue [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, 53(3): 373-383.
- [4] 张顶飞, 吕启航, 张鹏, 等. 基于响应面法的粉煤灰-电石渣地质聚合物固化软土试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(8): 1-10.
Zhang D F, Lyu Q H, Zhang P, et al. Experimental study on soft soil solidified by fly ash and carbide slag geopolymer based on response surface method [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2023, 42(8): 1-10. (in Chinese)
- [5] 刘青云, 李华安, 孙信誉, 等. 钢渣型复合基材在浅层软土固化中的应用[J]. 防灾减灾工程学报, 2020, 40(5): 811-817, 827.
Liu Q Y, Li H A, Sun X Y, et al. Application of steel slag composite in in-situ solidification of shallow soft soil [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020, 40(5): 811-817, 827. (in Chinese)
- [6] 王东星, 高向云, 杜怡莹, 等. 活性 MgO-粉煤灰固化黄土剪切特性试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2018, 38(5): 822-829.
Wang D X, Gao X Y, Du Y Y, et al. Experimental investigation on shear properties of reactive MgO-fly ash stabilized loess [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(5): 822-829. (in Chinese)
- [7] 刘瑾, 张峰君, 陈晓明, 等. 新型水溶性高分子土体固化剂的性能及机理研究[J]. 材料科学与工程, 2001, (4): 62-65.
Liu J, Zhang F J, Chen X M, et al. Study on the soil hardening properties and mechanism of a new water soluble polymeric soil hardening agent [J]. Materials Science & Engineering, 2001, (4): 62-65. (in Chinese)
- [8] 刘清秉, 项伟, 张伟锋, 等. 离子土壤固化剂改性膨胀土的试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(8): 2286-2290.
Liu Q B, Xiang W, Zhang W F, et al. Experimental study of ionic soil stabilizer-improves expansive soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(8): 2286-2290. (in Chinese)
- [9] 徐杨, 曹磊, 阎长虹, 等. 城市河道淤泥固化土干湿耐久性试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(5): 1028-1035.
Xu Y, Cao L, Yan C H, et al. Experimental study on drying-wetting durability of solidified urban river sludge [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(5): 1028-1035. (in Chinese)
- [10] 吴晓翔, 史燕南, 衡阳, 等. 固化海积淤泥土强度发展规律试验研究[J]. 水电能源科学, 2021, 39(11): 163-165.
Wu X X, Shi Y N, Heng Y, et al. Study on test of strength development of solidified marine silt [J]. Water Resources and Power, 2021, 39(11): 163-165. (in Chinese)
- [11] 钟石明, 李栋伟, 王红旗, 等. 固化淤泥土的力学特性试验研究[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(16): 7016-7024.
Zhong S M, Li D W, Wang H Q, et al. Experimental research on the mechanical properties of solidified silt [J]. Science and Technology and Engineering, 2023, 23(16): 7016-7024. (in Chinese)

(本文编辑: 苏泽云)

(下转第 1230 页)