

软土场地堆载预压与半刚性复合地基 交界区沉降特征研究

沈铭龙 戴一鸣 陈华晗

(福建省建筑设计研究院有限公司, 福建福州 350001)

【摘要】 为了研究堆载预压与半刚性复合地基处理交界区域变形特征,以某深厚软土地地基处理工程为例,建立了两种不同地基处理形式交界区域的有限元模型,分析了交界区域地表沉降及差异沉降在工后阶段的长期发展趋势。结果表明:(1)交界区地表沉降与差异沉降发展速率均呈现逐年减小的趋势;(2)差异沉降最大位置随时间发展不断由交界面位置向复合地基区域偏移,最终位于堆载坡肩外侧 1.9 倍堆高处,且不受桩间距影响;(3)地表坡率最大值与桩土置换率呈非线性关系,置换率低于 0.13 时提高置换率对最大差异沉降控制效果显著;(4)以地表坡率 0.5% 为标准,超限临界置换率约 0.114,当置换率低于该值时交界区差异沉降超限。对于常见的复合地基置换率,超限范围围绕最大值位置呈对称分布,宽度在 16 m 以内。

【关键词】 地基处理交界; 软土; 堆载预压; 复合地基; 沉降

【中图分类号】 TU472

【文献标识码】 A

doi: 10.20265/j.cnki.issn.1007-2993.2025-0257

Settlement characteristic at the junction area of surcharge preloading and semi-rigid composite foundation in soft soil sites

SHEN Minglong DAI Yiming CHEN Huahan

(Fujian Provincial Institute of Architectural Design and Research Co., Ltd., Fuzhou 350001, Fujian, China)

【Abstract】 To investigate the deformation characteristics of the junction area between surcharge preloading and semi-rigid composite foundation treatments, this paper takes a ground treatment project in a deep soft soil site as an example. A finite element model of the junction area with two different ground treatment types is established to analyze the long-term development trends of surface settlement and differential settlement in the post-construction stage. The results show that: (1) The development rates of both surface settlement and differential settlement in the junction area decrease year by year; (2) The location of the maximum differential settlement continuously shifts from the junction interface towards the composite foundation area over time, ultimately locating at a position 1.9 times the height of the surcharge slope shoulder outside, and is unaffected by the pile spacing; (3) The maximum value of the surface slope rate exhibits a nonlinear relationship with the pile-soil replacement ratio, and when the replacement ratio is lower than 0.13, the control effect on the maximum differential settlement is significant; (4) Using a surface slope rate of 0.5% as the standard, the critical replacement ratio for exceeding the limit is approximately 0.114. When the replacement ratio is lower than this value, the differential settlement in the junction area exceeds the limit. For common replacement ratios of composite foundations, the overlimit range is symmetrically distributed around the position of the maximum value, with a width within 16 meters.

【Key words】 ground treatment junction area; soft soil; surcharge preloading; composite foundation; settlement

0 引言

软土的工程特性极差,具有灵敏度高、渗透性低、压缩性强、抗剪强度低的特点^[1-2]。在软土地基上开展工程建设活动,常出现地基沉降过大或不均匀的情况,继而引发路面凹凸不平、地下管线断裂等病害,

严重影响建设项目的使用功能,甚至造成安全问题。目前常用的软土地基处理方法主要有预压固结、复合地基、刚性桩基础等方法。对于存在不同沉降控制标准及工期要求的综合型地基处理工程,往往需要通过多种地基处理方法并用来实现工程设计和

基金项目: 福建省青年科技人员育成项目(2025350061); 福建省住房和城乡建设科学技术计划项目(2025-K-119)

作者简介: 沈铭龙,男,1989年生,硕士,高级工程师,主要从事岩土工程设计与研究工作。E-mail: 244093156@qq.com

通信作者: 陈华晗,男,1992年生,硕士,工程师,主要从事岩土工程设计与研究工作。E-mail: 249867185@qq.com

工期、成本控制目标。由于加固机理的差异,不同类型地基的工后沉降发展特点差别较大,这使得地基交界区域呈现出与常规区域不一样的特点。首先,交界区的边界条件与常规区域不同,其边界受两种地基处理形式的控制;另外,不同地基处理形式对周边环境会产生不同程度影响,而交界区正是受影响较强的叠加区域。实际工程中不同地基交界位置出现明显不均匀沉降的案例屡见不鲜,然而现有的常规理论计算方法难以考虑上述问题,无法准确计算交界区的工后沉降。

目前,国内外学者关于不同地基处理形式交界区域的差异沉降问题研究较少。相关研究^[3-5]主要集中于路桥交界、挖填交界及新老路基交界等区域的差异沉降控制问题。路桥交界、挖填交界及新老路基交界等工况的特点是,不同地基处理方式之间常常存在显著的相互影响,尤其是当采用预压固结法与复合地基法等柔性地基处理形式时。陈仕文等^[6]利用有限元数值模型分析了深厚软土地基上真空预压施工对邻近复合地基桩身变形与内力的影响,并比较了各种防护措施的效果。乔京生等^[7]探究了堆载作用对邻近已承载 CFG 桩桩身位移、应力及承载力的影响,结果表明堆载的大小、作用位置以及复合地基土体压缩模量等因素对邻近堆载的复合地基的力学性状影响较大,合理的周边堆载设计有助于复合地基承载力的提高。然而以往研究主要聚焦于预压处理对周边环境、既有复合地基桩身受力及变形的影响,未考虑交界区的变形问题。因此,堆载预压与半刚性复合地基处理交界区的变形规律亟待研究。

本文依托实际工程案例,建立了堆载预压与水泥土搅拌桩复合地基交界区有限元模型,探究了两种地基处理形式交界区沉降及差异沉降的发展规律,为精细化、针对性的差异沉降控制设计提供了技术支撑。

1 项目概况

某校园项目建设场地位于山前冲积平原,场地地层中普遍存在淤泥软土层,层厚 1~40 m,分布不均,该层淤泥土呈现压缩性高、抗剪强度低的特点,工程性质极差。场地表层土层参数如表 1 所示。

由于现状场地标高低于设计地面标高 2~4 m,需进行大范围回填。根据岩土工程勘察报告土层空间分布和岩土参数,场地回填工后地面总沉降可采用分层总和法^[8]计算:

$$s = \sum s_i = \sum \frac{\Delta p}{E_s} h_i \quad (1)$$

式中: s 为地面总沉降; s_i 为分层沉降; Δp 为分层平均附加应力; E_s 为在该分层应力水平对应的压缩模量; h_i 为分层土层厚度。

表 1 土层物理力学参数表

Tab. 1 Physical and mechanical parameters of soil layers

土层名称	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	$w/\%$	e	E_s/MPa	c/kPa	$\varphi/(\text{°})$	f_{ak}/kPa
填土	17.8			4.0	10.0	12.0	70
淤泥	16.0	62.5	1.793	1.8	8.9	4.1	40
粉质黏土	19.2	28.8	0.811	5.4	28.0	13.1	180

经计算,在回填土及地面附加荷载作用下,场地若不进行地基处理,工后沉降量较大,部分区域地面沉降可达 1 m 以上,故需对软土地基采取针对性处理措施。

鉴于项目各区域场地软土层厚度、工期、沉降控制标准及附加荷载等条件各不相同,为实现工程设计和工期、成本控制目标,该项目场地采用多种地基处理形式。对于软土处理深度小于 20 m 的球场及部分场内道路区域,分区采用水泥土搅拌桩复合地基或堆载预压法进行地基处理。

堆载预压竖向排水体采用塑料排水板,板长 14 m,并按穿透淤泥层控制,排水板平面按正三角形布置,板间距 0.8 m。排水板顶设置一层 0.5 m 厚级配砂石垫层,垫层与堆载体中布置多道土工格栅。

水泥土搅拌桩复合地基采用单轴双向水泥土搅拌桩工艺,桩径 0.5 m,桩长 16 m,并按穿透淤泥层进入粉质黏土层不少于 0.5 m 控制,搅拌桩平面采用正三角形布置,桩间距 1.3 m。桩顶铺设一道双向土工格栅,并设置一层 0.3 m 厚级配砂石垫层。

为解决不同地基处理形式交界区域变形协调问题,以指导地基处理设计,采用有限元软件 Plaxis 2D 进行建模分析。

2 有限元计算模型

采用 Plaxis 2D 软件建立与实际工况相对应的二维平面应变有限元模型。模型概况如图 1 所示。左半侧为堆载预压区域,右半侧为复合地基区域,堆载坡肩为地基处理交界位置。

总体施工工序为在原始地面的基础上模型左半侧先进行堆土预压施工,满载预压 180 d 后,右半侧回填整平并施工搅拌桩复合地基,最后施加工后等效交通荷载。模型左边界及底边界不允许渗流,其余边界允许渗流。模型左右边界约束竖向位移,模型底边界约束竖向及水平向位移。

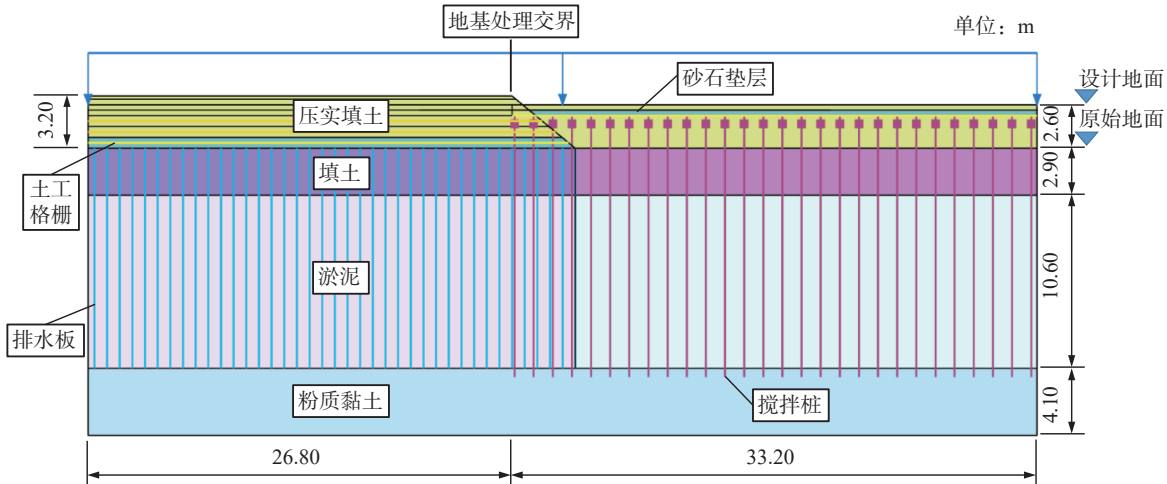


图1 模型概况

Fig. 1 Overview of the model

2.1 本构模型及参数

材料本构模型的选择及参数的取值是影响有限元计算的关键点。根据不同的土体性质,本研究选取了贴合特性的本构模型。杂填土、压实回填土及垫层采用土体硬化本构模型(HS)模拟,该模型可考虑土体的剪切硬化和压缩硬化,可模拟土体在主压缩条件下的不可逆压缩变形。该模型对沉降计算影响较大的刚度参数为侧限压缩模量 $E_{\text{sed}}^{\text{ref}}$ 、割线模量 E_{50}^{ref} 及卸载再加载模量 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$,一般需结合现场试验、室内试验和经验等综合对比确定^[9]。陈源^[10]从各个参数的物理力学意义出发,结合工程实际、PLAXIS手册及前人研究^[11],建立了勘察报告提供的常规参数值与模型主要参数的关系,即可近似取 $E_{\text{sed}}^{\text{ref}} = E_{\text{sl-2}}^{\text{ref}}$, $E_{50}^{\text{ref}} = (1 \sim 2)E_{\text{sed}}^{\text{ref}}$, $E_{\text{ur}}^{\text{ref}} = (4 \sim 6)E_{50}^{\text{ref}}$,其中 $E_{\text{sl-2}}$ 为100~200 kPa荷载下平均压缩模量。

淤泥及粉质黏土采用修正剑桥本构模型模拟。修正剑桥模型从理论上阐明了土体的弹塑性变形特点,在国际上已被广泛接受和应用。该模型的主要参数为等压固结曲线斜率 λ ,回弹曲线斜率 κ 和临界状态线斜率 M 。其中 λ 与 κ 可通过常规一维固结试验所获得的压缩指数 C_c 及回弹指数 C_s 求得,即 $\lambda = C_c / \ln(10)$, $\kappa = C_s / \ln(10)$ ^[12]。而临界状态线斜率 M 一般需要通过三轴不排水剪切试验获得。但根据张文俊^[13]的研究,当临界状态线斜率 M 变化幅度为15%时,对应沉降变化仅为0.5%,即 M 对于土体沉降模型计算结果影响较小。故本文 M 值参照文献^[12]中地区软土试验值取1.35。

由于在该项目大面积加载的复合地基工况下,搅拌桩几乎不可能发生破坏,故搅拌桩采用线弹性模型进行模拟。根据万宗江等^[14]的研究,搅拌

桩弹性模量 E 与无侧限抗压强度 f_{cu} 存在以下关系: $E = (300 \sim 500)f_{\text{cu}}$,因此通过搅拌桩无侧限抗压强度即可换算搅拌桩弹性模量。

土工格栅采用软件内置的土工格栅单元模拟,考虑为弹性材料,需设置的参数为格栅轴向刚度。李海江^[15]在其研究中对各型号土工格栅开展了拉伸试验,得到了格栅轴向拉伸力与应变的关系曲线。根据前期模型试算,在沉降发展过程中土工格栅应变均小于1%。本研究格栅轴向刚度取文献^[15]中C型土工格栅在最低拉伸速率工况下拉伸力-应变曲线上1%应变时的斜率计算刚度,得到单位宽度格栅刚度值为1800 kN/m。

2.2 水泥土搅拌桩复合地基等效渗透系数

水泥土搅拌桩渗透系数较小,工程中常采用搭接布置作为止水帷幕使用。对于大面积施工搅拌桩复合地基的场地,桩土置换率一般可达10%以上,受搅拌桩影响复合土体的渗透系数将发生下降,进而影响软土固结速度。由于在模型中搅拌桩采用桩单元模拟,并无实际体积,故搅拌桩区域土体渗透系数需进行修正以符合实际情况。本研究参考毕佳蕾等^[16]的处理方式,基于复合地基置换率等效理论,采用式(2)进行等效:

$$K_{\text{sp}} = mK_{\text{p}} + (1 - m)K_{\text{s}} \quad (2)$$

式中: K_{sp} 为水泥土搅拌桩复合地基区域土体等效渗透系数; m 为桩土置换率; K_{s} 为天然土体渗透系数; K_{p} 为搅拌桩渗透系数。

2.3 考虑土体固结密实影响的渗透系数

地表沉降的发展过程实质上是地基土体在附加应力的作用下发生固结的过程。在这个过程中,土体

孔隙比不断减小, 密实度不断上升, 将对土体的渗透性产生影响。对于在固结过程中孔隙比变化较大的软土、吹填土等, 该影响不可忽略^[17]。本文采用 Taylor^[18] 提出的 $e - \log k$ 关系式, 能较好地描述软土渗透系数随孔隙比的变化关系, 即:

$$e = e_0 + C_k \log \left(\frac{k}{k_0} \right) \quad (3)$$

式中: e_0 为初始孔隙比; k_0 为初始渗透系数; C_k 为曲线斜率, 一般情况下取 $C_k = 0.5e_0$ ^[17]。

2.4 排水板二维平面应变等效

在二维有限元模型中, 一般仅能通过设置排水线模拟竖向排水通道的排水行为。但二维平面应变模型中的排水线实际对应的是现实中的排水墙。技术上可基于等效固结度原则, 对排水板区域的土体渗透系数进行修正, 实现以排水墙模拟间隔布置的排水板。本文采用赵维炳等^[19] 的等效理论, 可计算得到考虑涂抹效应的等效渗透系数。

3 模型参数校准

对于填土与垫层材料参数、搅拌桩侧摩阻力与端阻力等指标, 勘察报告或规范^[20] 中仅提供经验估算值或合理范围值, 通过在合理范围内调整模型参数, 使模型计算结果与短期监测数据及载荷试验结果贴近, 可实现对模型参数的校准, 进而确保数值模型长期沉降计算结果的可靠性。

3.1 堆载预压区

图 2 为堆载预压施工时中心区域原始地表竖向位移随时间发展的实测曲线和数值模拟曲线, 对比两者可以发现, 其曲线变化规律基本一致, 竖向位移量值接近。

3.2 复合地基区

图 3 为搅拌桩基桩静载试验桩顶竖向位移随桩

顶荷载变化曲线及相应工况建模数值模拟曲线, 对比两者可以发现, 其加载及卸荷曲线变化规律基本一致, 相同荷载作用下桩顶竖向位移量值接近。

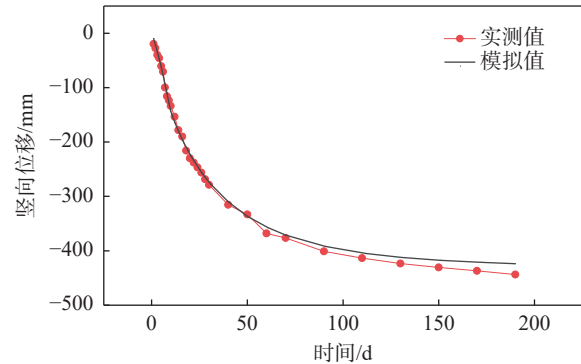


图 2 堆载预压区原始地表竖向位移随预压时间变化曲线
Fig. 2 Curve of vertical displacement of original ground surface in preloading area with preloading time

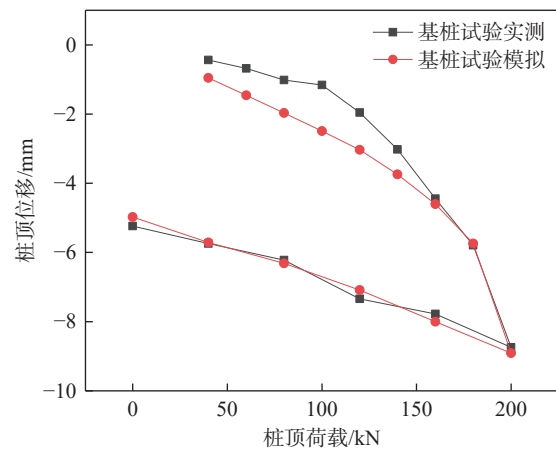


图 3 基桩静载试验桩顶竖向位移随桩顶荷载变化曲线
Fig. 3 Curve of vertical displacement at pile top with pile top load in static load test of foundation pile

以上结果表明, 本文所采用的本构模型及参数能够较为合理地反映堆载预压处理时的土体变形特征。经校准后的各项主要材料参数如表 2、表 3 所示。

表 2 HS 模型土层材料参数表

Tab. 2 Material parameters of soil layers in HS model

土层名称	重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	$E_{\text{ref}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{50}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	e_{ini}	等效水平 渗透系数 (排水板区域) $/(m \cdot d^{-1})$	等效竖直 渗透系数 (排水板区域) $/(m \cdot d^{-1})$	等效水平 渗透系数 (搅拌桩区域) $/(m \cdot d^{-1})$	等效竖直 渗透系数 (搅拌桩区域) $/(m \cdot d^{-1})$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$
压实填土	19.0	8.0	16.0	64.0	0.70	0.015	0.070	0.069	0.069	15.0	15.0
填土	17.8	4.0	8.0	32.0	0.90	0.019	0.087	0.086	0.086	10.0	12.0
砂石垫层	19.5	30.0	60.0	240.0	0.50	1.863	8.670	10	10	5.0	30.0

4 模型计算结果

4.1 地表工后沉降长期发展趋势分析

图 4 展现了场地地表位移曲线在不同工后时间

的变化情况, 负值代表位移方向向下。可以发现, 地表沉降总体呈现复合地基区大、堆载预压区小的特点, 两种地基处理区域之间出现差异沉降。复合地基

表 3 修正剑桥模型土层材料参数表

Tab. 3 Material parameters of soil layers in modified Cam-clay model

土层名称	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	λ	κ	M	e_{mi}	等效水平 渗透系数 (排水板区域) $/(\text{m}\cdot\text{d}^{-1})$	等效竖直 渗透系数 (排水板区域) $/(\text{m}\cdot\text{d}^{-1})$	等效水平 渗透系数 (搅拌桩区域) $/(\text{m}\cdot\text{d}^{-1})$	等效竖直 渗透系数 (搅拌桩区域) $/(\text{m}\cdot\text{d}^{-1})$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$
淤泥	16.0	0.235	0.128	1.35	1.973	8.88×10^{-6}	4.60×10^{-5}	3.48×10^{-5}	4.35×10^{-5}	8.9	4.1
粉质粘土	19.2	0.052	0.008	1.35	0.890	7.79×10^{-6}	3.84×10^{-5}	3.78×10^{-5}	4.31×10^{-5}	28.0	13.1

区虽然打设了搅拌桩,但搅拌桩刚度较小,桩间土与搅拌桩共同承担上部荷载,在场地大范围填土作用下,搅拌桩仍会随着淤泥固结产生一定的压缩量。而堆载预压区软土在投入运营前已完成了大部分固结沉降,仅靠近边界的区域因复合地基填土附加荷载的扩散产生了一定的沉降。

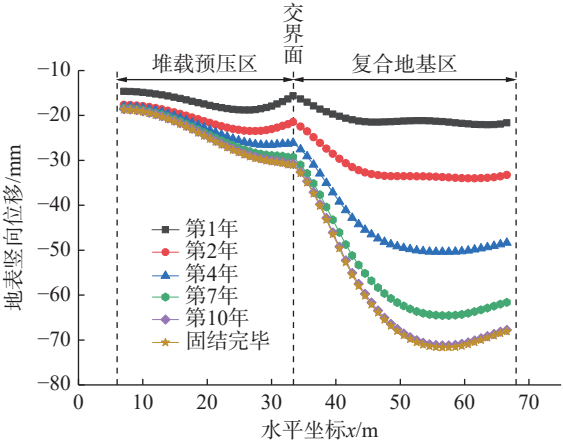


图 4 不同工后时间地表沉降与水平坐标 x 关系曲线
Fig. 4 Curve of ground surface settlement with horizontal coordinate x at different post-construction times

由第 1 年、第 4 年、第 7 年和第 10 年等时间间隔位移曲线可见,在相同的时间间隔内,前期曲线分布稀疏,后期曲线更为密集,表明场地整体沉降发展速率逐年减小。

4.2 地表工后差异沉降长期发展趋势分析

通过对地表沉降关于水平距离求导数,可得地表坡率与水平坐标 x 的关系曲线,不同工后时间点的曲线如图 5 所示。地表坡率反映的即是单位长度的差异沉降。由图 5 可见,随着时间的推移,场地大部分区域地表坡率呈现增长趋势,当场地基土均固结完毕时出现最大值,约为 0.4%。坡率最大值点 x 坐标随着工后时间的发展,不断向复合地基方向移动,由最初的地基处理边界外侧 1 m 位置,逐渐移动到 6 m 左右。初步推断,最大差异沉降并非恰好出现在分界面处可能是由于堆载分界面外侧斜坡也存在着一定的预压作用,减小了分界面处复合地基的后期沉降,形成了原生的过渡区。

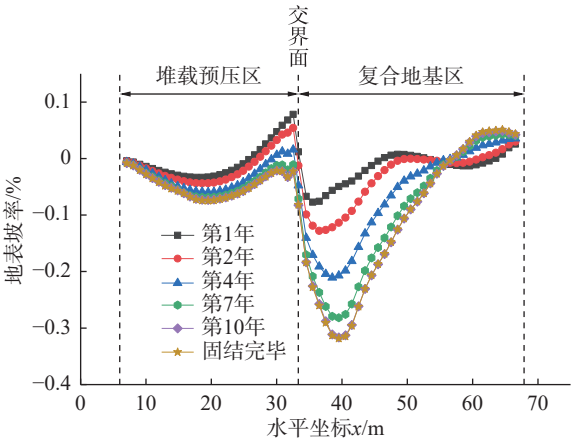


图 5 不同工后时间地表坡率与水平坐标 x 关系曲线
Fig. 5 Curve of ground surface slope rate with horizontal coordinate x at different post-construction times

通过等时间间隔曲线疏密程度对比同样可以发现,场地整体差异沉降发展速率逐年减小。

4.3 地表工后差异沉降与搅拌桩间距关系分析

堆载预压设计一般按固结度控制设计,相同工况下设计差别较小,而搅拌桩复合地基在沉降计算和承载力确定方面,不同设计标准间差异显著。以前文所述工况为基准,搅拌桩桩间距更改为工程中其他常见间距,可得到不同搅拌桩间距下固结完毕时刻地表坡率与水平坐标关系曲线,如图 6 所示。

由图 6 可见,随着复合地基搅拌桩间距的增加,

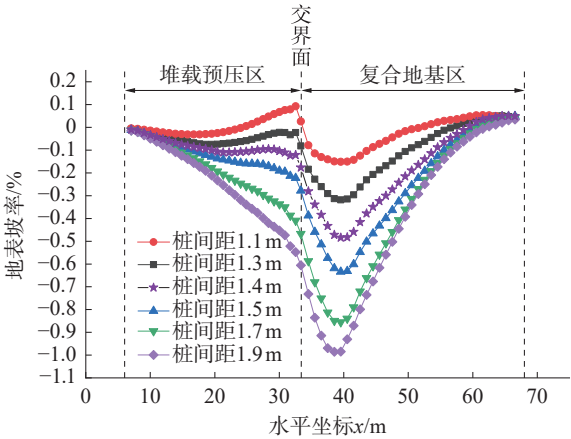


图 6 不同搅拌桩间距地表坡率与水平坐标 x 关系曲线
Fig. 6 Curve of ground surface slope rate with horizontal coordinate x at different mixing pile spacings

交界区地表差异沉降发展范围及坡率最大值均有所增大。桩间距对最大坡率的出现位置影响较小,最大值均出现在堆载预压坡肩外侧约 6 m 位置。由此可推断,搅拌桩设计参数对地表最大差异沉降位置影响较小;而堆载预压一般按固结度控制设计,差别主要源于上部堆载高度及形状,在常见的 1:1 堆载边界坡率下,最大坡率位置可参数化表征为距坡肩约 1.9 倍堆载高度位置。

4.4 置换率对差异沉降超限范围影响及临界指标分析

桩间距改变实质上是桩土置换率的改变。对于复合地基,桩土置换率直接影响地基承载力及刚度。将图 6 桩间距归一化为桩土置换率,可作置换率 m 与坡率最大值关系曲线,见图 7。

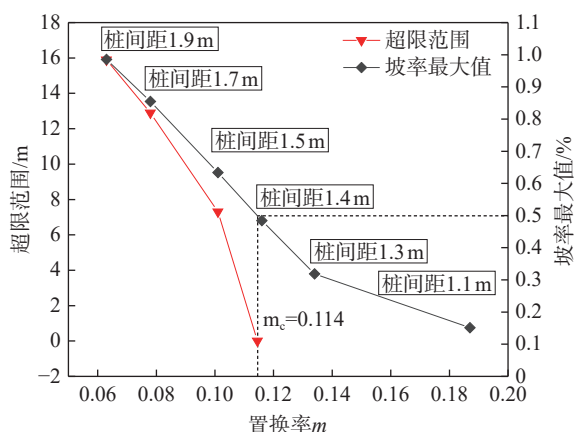


图 7 坡率最大值及超限范围与置换率关系曲线

Fig. 7 Curve of maximum slope rate and over-limit range with replacement ratio

由图 7 曲线可见,坡率最大值随置换率的提高不断减小。当置换率处于较低水平时,曲线斜率较大,当置换率增大到约 0.13 后,曲线斜率明显减小。这说明当桩土置换率较低时,加密桩间距对差异沉降的控制效果较为明显,当桩土置换率达到约 0.13 以后,继续提高置换率对差异沉降控制的效率显著下降。

此外,根据国家行业标准《体育建筑设计规范》(JGJ 31—2003)^[21],球场地面坡度应不大于 0.5%;根据丁龙亭等^[22]关于行车乘员舒适性与地表坡率关系的研究,对于 40 km/h 时速工况,地表坡率小于 0.52% 时,车辆乘员舒适性极好。综合上述研究成果,以地表坡率 0.5% 为差异沉降超限标准,在最大坡率与置换率关系曲线中,可以得到对应超限临界置换率 m_c 约为 0.114。此时所有区域地表差异沉降均满足要求。

当置换率小于临界值时,出现部分区域地表差

异沉降超限,超限范围与置换率的关系如图 7 中相应曲线所示。对于常见置换率工况,差异沉降超限范围宽度约为 0~16 m,结合图 6 可知,超限区基本以最大值位置为轴线对称分布,且随着置换率增大,超限范围的缩减速率呈逐渐加快趋势。

尽管实际工程工况多样,与模拟场景可能存在差异,但堆载预压地基刚度由固结度主导,复合地基刚度主要受置换率制约,两者刚度差异关系基本由预压固结度与置换率控制,故上述结果具有一定代表性,可供实际工程参考。当实际工程中需要对差异沉降进行处理时,可以距坡肩 1.9 倍堆载高度处为中线,查取图 7 超限宽度确定处理范围,并结合具体措施作适当延伸。

为与工程设计中各地基处理形式独立计算的常规流程形成参照,建立临界置换率为 0.114 的工况模型,通过计算远离交界面处堆载预压与复合地基的最终沉降值,得出两者差值约为 95 mm。在与本文类似工况实际工程设计场景下,可直接依据理论公式或规范方法,在不考虑交界效应影响的前提下,分别计算堆载预压地基与复合地基的沉降量。若二者沉降差值不超过 95 mm,可判定地基处理交界位置的差异沉降满足舒适性要求及规范标准,无需额外处理;反之,则需采取差异沉降控制措施。

5 结论

本文建立了堆载预压与水泥土搅拌桩复合地基交界区有限元模型,并通过试验结合工程经验对模型参数校准,利用短期监测数据对模型进行验证,运用该数值模型对地基处理交界区域的工后沉降发展数据开展分析,得出以下结论:

- (1) 水泥土搅拌桩复合地基区域工后沉降大于堆载预压区,导致交界区域产生差异沉降。地表总沉降及交界区差异沉降发展速率均呈现逐年减小的趋势。
- (2) 由于堆载预压边界放坡的影响,差异沉降最大值的出现位置并非位于地基处理交界面处。随着时间推移,该位置持续向复合地基区域偏移,从初始位于地基处理边界外侧约 1 m 处,逐步迁移至外侧约 6 m 处(约为 1.9 倍堆载高度),且该最值点位置不受桩间距变化的影响。
- (3) 地表坡率最大值随桩土置换率的提高呈现先快速降低后趋缓的非线性规律。当置换率低于 0.13 时,提高置换率对差异沉降的控制效果显著,置换率超过 0.13 时,继续提高置换率对差异沉降控制的效果显著下降。
- (4) 以地表坡率 0.5% 为差异沉降超限标准,确

定超限临界置换率 m_c 约为 0.114。置换率小于该临界值时, 部分区域出现差异沉降超限, 且超限范围随置换率降低呈扩大趋势, 常见工况下超限宽度为 0~16 m。值得注意的是, 置换率越大, 超限范围的缩减速率呈加快趋势, 反映出置换率对差异沉降空间分布的显著调控作用。

(5)在与本文类似工况工程设计中, 在不考虑交界效应情况下分别计算堆载预压区及复合地基区的沉降, 当两者的差值 ≤ 95 mm时, 可大致判断地基处理交界位置的差异沉降满足舒适性或规范要求, 无需额外处理; 否则, 应采取差异沉降控制措施。工程设计中, 可以交界面外 1.9 倍堆载高度为中点, 根据置换率按图 7 查取超限宽度, 确定差异沉降处理范围, 并结合具体措施作适当延伸。

(6)值得注意的是, 对于软土厚度变化幅度较大场地, 软土厚度的变化方向将对交界区差异沉降产生一定影响。当淤泥层厚度朝着复合地基区域逐渐增大时, 会进一步加剧交界区的差异沉降; 反之, 则能有效缓解交界区的差异沉降。

参 考 文 献

- [1] 岳长辉. 铁路荷载下平潭滨海相软土动力变形及强度特性试验研究[J]. 工程勘察, 2024, 52(3): 1-7. (YUE C H. Experimental study on dynamic deformation and strength characteristics of Pingtan coastal soft soil under railway loading[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2024, 52(3): 1-7. (in Chinese))
- [2] 何忠意, 郑伟文, 朱佩宁, 等. 某近海软土地基真空联合堆载预压法工程实例分析[J]. 工程勘察, 2019, 47(2): 1-8, 78. (HE Z Y, ZHENG W W, ZHU P N, et al. Analysis on vacuum combined surcharge preloading method in offshore soft foundation treatment engineering[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2019, 47(2): 1-8, 78. (in Chinese))
- [3] 何玉琼, 王寿武, 肖建宇, 等. 路桥过渡段软土地基加固沉降对比分析[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(1): 313-321. (HE Y Q, WANG S W, XIAO J Y, et al. Comparative analysis of settlement for soft soil foundation reinforcement in the road and bridge transition section[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2022, 18(1): 313-321. (in Chinese))
- [4] 唐朝生, 刘义怀, 施 斌, 等. 新老路基拼接中差异沉降的数值模拟[J]. 中国公路学报, 2007, 20(2): 13-17. (TANG C S, LIU Y H, SHI B, et al. Numerical simulation on differential settlement of jointing of new and old roadbed[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(2): 13-17. (in Chinese))
- [5] 周志刚, 郑健龙, 李 强. 土工格网处理填挖交界路基非均匀沉降的机理分析[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(5): 576-579. (ZHOU Z G, ZHENG J L, LI Q. Analysis of the mechanism of using geonets to treat the unequal settlement of subgrade at the cut to fill location[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(5): 576-579. (in Chinese))
- [6] 陈仕文, 李 栋, 汪 旭. 超深软土区真空预压对复合地基的影响及其防治[J]. 地下空间与工程学报, 2024, 20(2): 690-700. (CHEN S W, LI D, WANG X. Influence of vacuum preloading on composite foundation in ultra-deep soft soil area and its prevention[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2024, 20(2): 690-700. (in Chinese))
- [7] 乔京生, 赵晓波, 杨秀敏, 等. 堆载作用对邻近 CFG 桩复合地基影响的数值模拟研究[J]. 唐山学院学报, 2012, 25(3): 53-56, 92. (QIAO J S, ZHAO X B, YANG X M, et al. Numerical analysis of the CFG piles composite foundation influenced by lateral soil movement due to heap loads[J]. Journal of Tangshan University, 2012, 25(3): 53-56, 92. (in Chinese))
- [8] 殷宗泽. 土工原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007. (YIN Z Z. Principles of geotechnical engineering[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2007. (in Chinese))
- [9] 周恩平. 考虑小应变的硬化土本构模型在基坑变形分析中的应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010. (ZHOU E P. Application of hardening soil model with small-strain in deformation analysis for foundation pit[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. (in Chinese))
- [10] 陈 源. 海口某深基坑支护数值模拟及土体本构模型研究[D]. 海口: 海南大学, 2014. (CHEN Y. Study on numerical simulation and the soil constitutive model of a deep excavation retaining in Haikou[D]. Haikou: Hainan University, 2014. (in Chinese))
- [11] 王卫东, 王浩然, 徐中华. 基坑开挖数值分析中土体硬化模型参数的试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(8): 2283-2290. (WANG W D, WANG H R, XU Z H. Experimental study of parameters of hardening soil model for numerical analysis of excavations of foundation pits[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(8): 2283-2290. (in Chinese))
- [12] 洪辉煌. 福州地区软土的修正剑桥模型试验及其数值模拟验证[J]. 福建建筑, 2011(12): 69-71. (HONG H H. Modified cam-clay model test and numerical simulation of soft soil in Fuzhou[J]. Fujian Architecture &

- Construction, 2011(12): 69-71. (in Chinese))
- [13] 张文俊. 基于修正剑桥模型的刚性桩复合地基固结分析研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2013. (ZHANG W J. Consolidated analysis of rigid pile composite foundation based on modified cam-clay model[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013. (in Chinese))
- [14] 万宗江, 朱碧堂. 土钉墙+水泥土桩墙联合支护结构的力学特性分析 [J]. 土木与环境工程学报 (中英文), 2020, 42(4): 10-18. (WAN Z J, ZHU B T. Analysis of mechanical properties of a novel support structure with soil nailing wall combined with cemented soil pile/wall for deep excavation[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(4): 10-18. (in Chinese))
- [15] 李海江. 双向塑料土工格栅拉伸特性试验研究 [D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2018. (LI H J. Experimental study on tensile properties of bidirectional plastic geogrid[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2018. (in Chinese))
- [16] 毕佳蕾, 沈振中, 旦增赤列. 振冲碎石桩复合地基的等效渗透系数计算方法 [J]. 水电能源科学, 2017, 35(11): 87-90. (BI J L, SHEN Z Z, TENZIN T. Calculation method of equivalent permeability coefficient for vibroflotation gravel pile composite foundation[J]. Water Resources and Power, 2017, 35(11): 87-90. (in Chinese))
- [17] 牛飞, 邱长林, 闫澍旺, 等. 真空预压下考虑渗透系数变化的吹填土地基固结分析 [J]. 中国港湾建设, 2013(1): 29-34. (NIU F, QIU C L, YAN S W, et al. Analysis on consolidation of hydraulically reclaimed soil under vacuum preloading with change of permeability[J]. China Harbour Engineering, 2013(1): 29-34. (in Chinese))
- [18] TAYLOR D W. Fundamentals of soil mechanics[M]. New York: John Wiley & Sons Inc. , 1948: 700.
- [19] 赵维炳, 陈永辉, 龚友平. 平面应变有限元分析中砂井的处理方法 [J]. 水利学报, 1998(6): 54-58. (ZHAO W B, CHEN Y H, GONG Y P. A methodology for modeling sand-drain ground in plain strain analysis[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998(6): 54-58. (in Chinese))
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基处理技术规范: JGJ 79—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for ground treatment of buildings: JGJ 79—2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013. (in Chinese))
- [21] 中华人民共和国建设部, 国家体育总局. 体育建筑设计规范: JGJ 31—2003[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004. (Ministry of Construction of the People's Republic of China, General Administration of Sport of China. Design code for sports building: JGJ 31—2003[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004. (in Chinese))
- [22] 丁龙亭, 王选仓, 付林杰, 等. 基于行车舒适性的土工格栅处治涵洞路基差异沉降技术 [J]. 材料导报, 2021, 35(4): 4079-4087. (DING L T, WANG X C, FU L J, et al. Research on differential settlement technology of culvert subgrade treated by geogrid based on driving comfort[J]. Materials Reports, 2021, 35(4): 4079-4087. (in Chinese))

收稿日期: 2025-06-09