



XCC 刚性桩复合地基荷载传递时效性 数值模拟研究

李军胜¹, 亓戈平², 陈如月³, 徐英超¹, 秦欢³, 严鑫³

(1. 扬州万福投资发展有限责任公司, 江苏扬州 225000; 2. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045;
3. 江苏邗建集团有限公司, 江苏扬州 225000)

摘要: XCC(X-sectional Cast-in-place Concrete pile)刚性桩复合地基作为一种以异形桩为核心的新型复合地基形式,能够有效提高桩侧摩阻力、减小沉降并增强承载能力,近年来逐渐应用于软土地基的处理工程中,但目前大多数研究尚未充分考虑复合地基在受荷过程中桩、土及垫层的时效性变化规律。通过ABAQUS有限元软件建立包含桩、土、褥垫层及路堤的三维数值模型,系统分析布桩形式与截面形状、桩间距、路堤高度、XCC尺寸及桩帽高度等因素对XCC刚性桩复合地基承载特性时效性的影响。结果表明:随桩间距、路堤高度及桩帽高度的增大,XCC刚性桩复合地基的表面沉降与桩土应力比均呈上升趋势;不同截面形状及布桩方式对超孔压消散影响较小,但矩形布桩能形成更高的土拱效应;XCC桩的强弱轴侧摩阻力分布存在差异,导致中性点位置不同。

关键词: XCC桩;刚性桩复合地基;地基处理;时效性分析;有限元模拟

中图分类号: TU473.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(XXXX)XX-0001-14

Numerical simulation on the time-dependent load transfer of XCC rigid pile composite foundation

LI Junsheng¹, QI Geping², CHEN Ruyue³, XU Yingchao¹, QIN Huan³, YAN Xin³

(1. Yangzhou Wanfu Investment Development Co., Ltd., Yangzhou 225000, Jiangsu, P. R. China; 2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 3. Jiangsu Hanjian Group Co., Ltd., Yangzhou 225000, P. R. China)

Abstract: As a novel composite foundation system featuring an X-shaped cross-section rigid pile, the XCC rigid pile composite foundation has been increasingly applied in soft soil improvement projects due to its capability to effectively enhance side friction resistance, reduce settlement, and improve bearing capacity. However, most existing studies have not sufficiently considered the time-dependent behavior of piles, soils, and cushion layers under loading. To address this issue, this study established a three-dimensional finite element model using ABAQUS, incorporating piles, soils, cushion layers, and embankments, to systematically analyze the effects

收稿日期: 2025-11-01

基金项目: 重庆市留学人员回国创业创新支持计划(cx2022007)

作者简介: 李军胜(1978-),男,高级工程师,主要从事市政道路、桥梁、排水管网建设研究, E-mail: 87935675@qq.com。

亓戈平(通信作者),男,博士生, E-mail: 794178309@qq.com.

Received: 2025-11-01

Foundation item: Chongqing Returned Students Entrepreneurship and Innovation Support Plan (No. cx2022007)

Author brief: LI Junsheng(1978-), senior engineer, research interests: construction of municipal roads, bridges, and drainage pipeline networks, E-mail: 87935675@qq.com.

QI Geping (corresponding author), PhD candidate, E-mail: 794178309@qq.com.

of pile layout and cross-sectional shape, pile spacing, embankment height, XCC geometry, and pile cap height on the time-dependent bearing characteristics of XCC rigid pile composite foundations. The results show that, as the spacing of the piles, the height of the embankment and the height of the pile cap increase, the surface settlement of the XCC rigid pile composite foundation and the pile-soil stress ratio both show an upward trend. Differences in cross-sectional shape and pile layout have little influence on excess pore pressure dissipation; however, rectangular layouts can induce higher soil arching effects. Furthermore, the side friction resistance of XCC piles differs between the strong and weak axes, leading to varying positions of the neutral point. Overall, the XCC rigid pile composite foundation exhibits distinct time-dependent characteristics under load, and its unique cross-sectional geometry promotes optimized stress transfer and settlement coordination, providing a valuable reference for the long-term performance analysis and design of soft ground composite foundations.

Keywords: XCC pile; rigid pile composite foundation; soil improvement; time-dependent analysis; finite element simulation

刚性桩体复合地基是以刚性桩作为地基中的竖向增强体并与地基土共同承担荷载的人工地基,也是竖向增强体复合地基,以XCC桩(X-sectional Cast-in-place Concrete pile,简称XCC桩)为代表的异形桩近年来被不断应用于工程实践当中。相较于圆形现浇混凝土(CCC)桩,XCC桩能在提升桩的侧摩阻力的同时进一步增加复合地基的承载能力。

近年来,学者围绕XCC桩的承载特性及工程应用开展了广泛研究。其中,刘芝平等^[1]、王智强等^[2]、张敏霞等^[3]通过大型足尺模型试验,对XCC桩与等截面圆桩的承载力、端阻力及侧摩阻力进行了系统观测对比,结果表明,二者承载特性具有一定的相似性。袁估^[4]依托大型桩基模型槽试验装置,对比分析了X形桩与圆形桩的承载性能,指出在混凝土用量相同的条件下,X形桩能有效提高截面利用率及极限承载力,为其工程应用提供了重要依据。张敏霞等^[5-7]进一步通过足尺静载试验,对XCC桩与等截面面积圆桩、等截面周长圆桩进行对比分析,验证了XCC桩在竖向承载性能方面的显著优势,为其设计与研究提供了可靠参考。刘汉龙等^[8]、杨挺等^[9]、Lv等^[10-12]、丁选明等^[13]、孔纲强等^[14]基于南京桥北污水处理厂软土地基加固工程,开展了等截面面积XCC桩与圆桩复合地基的对比研究,结果表明,XCC桩复合地基在荷载-沉降特性、桩-土应力比及桩侧摩阻力分布方面与传统圆桩相似,但在总体承载力上表现更为优越。周航等^[15]开展了4组不同布桩形式的室内模型试验,得到了软土中XCC刚性桩复合地基承载特性随时间的变化,并揭示了刚性桩复合地基不同截面和不同布桩情况下的差异。胡文强等^[16]基于透明土试验,开展了XCC桩与圆形桩群桩沉桩贯入试验,研究了不同桩型和不同沉桩顺序对群桩沉桩挤土效应的影响。费康^[17]通过有限元分析进一步得出XCC桩的异性效应较H形桩相对

较弱。Zhou等^[18]利用耦合欧拉-拉格朗日(CEL)方法对XCC桩在不排水黏土中的贯入过程进行了大变形数值模拟,揭示了截面形状对贯入机制及桩土应力传递特征的影响,并明确了圆桩与XCC桩在应力机制上的差异。

目前,不少学者针对刚性桩复合地基的承载性能进行了研究和探索。HAN等^[19]考虑了三个主要影响因素,并通过数值模拟来研究桩-土壤-土工合成材料之间的相互作用;朱世哲等^[20]探讨了在考虑桩顶和桩端刺入情况下,带垫层的刚性桩复合地基桩土应力比的计算方法,并论证了不同影响因素对桩土应力比的影响;汪凯等^[21]引入了桩土变形协调作为边界条件,建立了桩-土-褥垫层的计算模型,并推导得到了相关的桩土应力比的迭代方程;Randolph等^[22-23]从桩土承载特性和荷载传递法的角度对群桩进行研究,采用经过验证的数值技术来验证所做的假设,得出了桩的荷载-沉降比;缪林昌等^[24]引入复合地基各部分之间的变形关系,并推导了适用于刚性桩复合地基的桩土应力比的简化公式;刘明泉等^[25]通过有限元软件模拟后发现,刚性桩由于桩帽的存在,可以显著降低复合基础的应力集中,并且发现带桩帽刚性桩的承载性能要更为优秀;Lee等^[26-27]利用ABAQUS软件模拟不同群桩影响因素对桩身负摩阻力、群桩效应以及桩顶下拽沉降的影响,揭示了群桩的承载特性;Comodromos等^[28]进行了单桩和桩群的三维非线性分析,利用FLAC3D软件针对不同研究案例进行模拟,得到负摩阻力对桩基础的影响;鲍宁^[29]采用离散元数值模型探究不同桩形布置对土拱效应的影响,得到了不同布桩形式下路堤在荷载传递效率和等沉面高度方面的分布特点。

尽管学者针对XCC桩及刚性桩复合地基开展了较多研究,但目前对XCC刚性桩复合地基承载特

性随时间变化的研究尚少,尤其是大部分研究忽略了路堤中土拱效应、褥垫层和地基固结随时间变化的影响,针对软土地基中 XCC 刚性桩复合地基承载时效性影响因素的研究仍显不足。虽然试验研究能够直观反映 XCC 刚性桩承载特性随时间的变化规律,但受限于试验周期、加载条件及环境因素,尤其是研究承载特性随时间变化的情况需要较高的费用和大量的时间,不适合将影响参数的研究进行逐个分析,采用数值分析方法开展系统研究显得尤为必要。现有的数值分析大部分采用默认地基土中的孔隙比随时间和深度不发生变化,也很少能完整地路堤、垫层、桩和土随时间变化的承载特性表现出来。因此,需要通过合适的有限元模型进行数值分析研究。

1 数值模型

通过 ABAQUS 有限元软件建立软土地基中桩、土、褥垫层和路堤相互作用的三维数值模型,通过模拟竖向荷载作用下的受力过程,对 XCC 刚性桩复合地基体系的时效性特征进行分析。

1.1 模型构建

XCC 刚性桩复合地基作为一种典型的群桩悬浮桩复合地基形式,其几何尺寸及网格划分方式对有限元数值模拟的计算精度与效率具有显著影响。为更加准确地揭示桩-土-垫层-路堤体系在竖向荷载作用下的时效性响应特征,同时兼顾工程计算的可操作性与经济性,有必要对模型进行合理的简化与优化。

鉴于 XCC 刚性桩截面及荷载分布均具有对称特征,采用 1/4 对称单元进行模拟^[30]。图 1(a)为 XCC 刚性桩矩形布桩下的复合地基平面示意图,图 1(b)为在 ABAQUS 软件中选取的数值分析区域。相较于全尺寸模型,该建模方法不仅显著提升了计算效率与数值精度,也有效降低了计算资源的占用。最终建立的三维有限元模型如图 2 所示。

由图 2 可知,模型中各结构参数设置为:路堤高

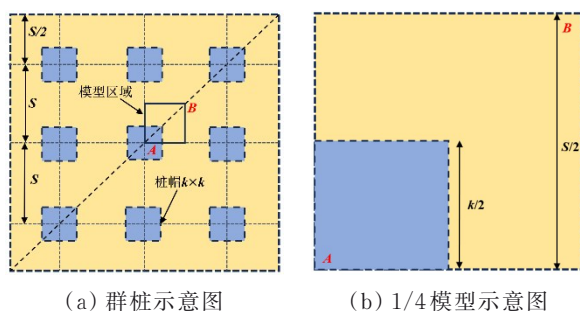


图 1 有限元模型平面示意图

Fig.1 Plan view of finite element model

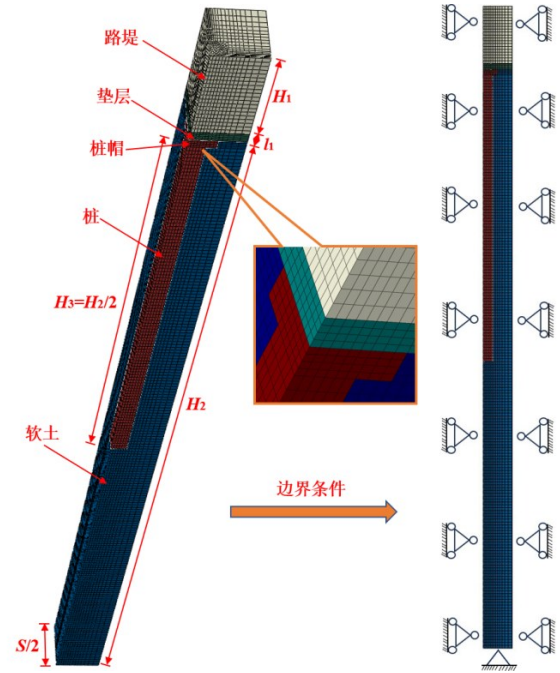


图 2 XCC 刚性桩复合地基三维有限元模型示意图

Fig.2 Three-dimensional finite element model of XCC rigid pile composite foundation

度 $H_1=2\text{m}$,垫层地厚度 $l_1=0.2\text{m}$,桩帽尺寸 $k=1\text{m}$,桩帽高度 $l_2=0.2\text{m}$,桩的等效半径 $r=0.25\text{m}$,桩间距 $S=1\text{m}$,软土地基的高度 $H_2=20\text{m}$,桩高 $L=H_2/2=10\text{m}$,A 和 B 分别为桩中心处和桩间土中心处位置。在进行网格划分时,为提高计算精度,桩体及其周围土体区域采用较密集的网格划分,而远离桩体的外部边界区域则适当加粗网格。

所有三维有限元模型在加载前先建立地应力平衡,然后在复合地基的路堤上部施加 100 kPa 的均布荷载,以模拟实际工况下的外部荷载作用。有限元数值分析中采用静载加载的方式,计算所获得桩-土-垫层体系的应力、位移及沉降等关键响应特征可以在结果文件(ODB)文件中得到相关结果。

1.2 材料接触及边界条件

考虑到垫层-桩-土界面处于法向与切向两方向的相互作用,在 ABAQUS 中对相关接触进行定义,即对模型中桩与土、桩与褥垫层、褥垫层与土、褥垫层与路堤之间设置接触面,而在法向作用方向上的接触性质采用摩擦接触中的“hard”接触准则,接触面切向调节系数取 0.02 。考虑到黏土中桩与土的接触情况,摩擦系数取 $\tan(0.7\varphi)^{[31]}$ 。

为研究桩间土固结过程中 XCC 刚性桩复合地基的时效性特征,在数值分析中设置了边界与排水条件,以减少边界效应并提高计算精度。模型基于布桩形式及受荷特征的对称性,在模型的 X、Y 方向尺寸上各取桩间距的一半,且在竖向范围内延伸至桩端以下 1 倍桩长,以减弱侧界与底界对计算域的

影响(见图2)。在位移边界方面,对称面施加对称约束,其余侧界面在X、Y方向限制水平位移,底部节点约束全部自由度以防止整体刚体运动。在渗流与排水条件设置中,为体现固结效应,桩间土体上表面定义为可排水边界,其他侧界及底部设置为不透水边界,地下水位设定与地表齐平。

1.3 材料本构及单元类型

由于实际岩土工程的复杂性,在ABAQUS数值模拟中针对不同区域选用不同的本构模型以提高计算精度。路堤填土与褥垫层采用Mohr-Coulomb理想弹塑性模型,该模型参数较少、物理意义明确,能较好地反映材料的强度特性且易于获取计算所需数据;XCC桩采用线弹性模型;地基土部分则选用修正剑桥模型,以考虑上部荷载作用下复合地基中土体的固结与渗流效应。修正剑桥模型作为岩土工程中应用最广的本构模型之一,能较好地描述正常固结黏土的应力-应变关系,计算结果与工程实际相符度较高。

在研究XCC刚性桩复合地基的承载特性时,由于实际地基土体的应力状态并非恒定,合理设定初始应力条件对于数值分析的准确性至关重要。考虑到地基土为正常固结黏土,设土体经历了一维 K_0 正常固结,则竖向初始应力 σ'_{v0} 和水平初始应力 σ'_{h0} 为:

$$\sigma'_{v0} = \gamma' z \quad (1)$$

$$\sigma'_{h0} = K_0 \sigma'_{v0} \quad (2)$$

式中: K_0 是初始水平土压力系数,考虑到水平方向

无变形,取为 $v/(1-v)$; γ' 为软黏土重度, kN/m^3 。则初始初步平均应力 $p'_0 = (1 + 2K_0)(\gamma' z)/3$, 偏应力 $q_0 = (1 - K_0)\gamma' z$ 。

对于正常固结土,各点的应力状态都落在屈服面上,则各点对应的屈服面大小 p'_c 为

$$p'_c = \frac{q_0^2}{M^2 p'_0} + p'_0 \quad (3)$$

根据修正剑桥模型,各深度初始孔隙比 e_0 为

$$e_0 = e_1 - (\lambda - \kappa) \ln p'_c - \kappa \ln p'_0 \quad (4)$$

式中: λ 为各项等压曲线斜率; κ 体积模量对数; M 临界状态线斜率。

为在ABAQUS中更准确地模拟地基初始应力与孔隙比随深度及时间的变化规律,采用子程序VOIDRI对上述过程进行模拟。

在三维数值建模过程中,路堤填土、褥垫层及XCC桩均采用8节点减缩积分实体单元(C3D8R)进行模拟计算;地基部分则采用8节点减缩积分实体单元(C3D8P)进行分析。该模型的计算参数分别如表1和表2所示^[31, 32]。

表1 莫尔-库仑模型与线弹性模型计算参数

Table 1 Calculation parameters of Mohr-Coulomb model and linear elastic model

土层名称	厚度/m	重度/(kg/m^3)	黏聚力/kPa	泊松比	内摩擦角/(°)	压缩模量/MPa
褥垫层	0.2	20	350	0.2	30	300
刚性桩	10	24		0.2		2×10^4
路堤	2	19.5	10	0.3	10	20

表2 修正剑桥模型计算参数

Table 2 Correction of Cambridge model calculation parameters

土层名称	厚度/m	重度/(kg/m^3)	回弹曲线斜率K	各项等压曲线斜率 λ	临界状态线斜率M	屈服面屈服系数 β	泊松比	孔隙比 e	体积模量对数 κ	渗透系数/(m/d)
地基土	20	19.5	0	0.15	1	1	0.35	2	0.03	4.32×10^{-4}

1.4 数值模型验证

根据文献[31]验证模型试验的可靠性。几何工况依照现场试验取值,路堤填土高度为5.6 m,桩为桩径1 m的圆桩,桩间距为3 m,地基土为25 m厚软土地基。对比结果如图3所示,数值模拟得到的桩土应力比随时间变化的整体趋势与实测结果较为一致,均在约160 d后趋于稳定,能够较好反映荷载传递的时效性特征。值得注意的是,数值模拟中桩土应力比的前期上升速度略快于实测值,其原因在于现场试验需考虑施工步骤及现场因素,因此实测曲线前段的增长速度相对较缓。总体而言,数值模型能够较为准确地模拟刚性桩复合地基荷载传递的时效性问题。

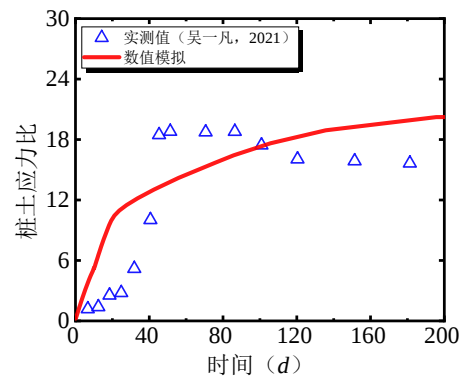


图3 试验与模拟桩土应力比对比

Fig. 3 Comparison of the stress ratio between the test and the simulated pile and soil

2 无量纲归一化分析

为了能更加准确直观地表示参数间的影响情况,基于无量纲分析方法并引入 π 定理,对XCC刚性桩复合地基时效性问题的主要物理量及其维度 $D=\{M,L,T\}$ 进行归纳。选取的物理变量包括 $V=\{y,\Delta y,\Delta u,H_1,L,p,F,F_c,t,p_c,D,k\}$,其中 $y,\Delta y,\Delta u,H_1,L,p,F,F_c,t,p_c,D,k$ 分别为路堤表面沉降、桩土表面沉降差、超孔压、路堤高度、桩长、荷载、桩身轴力、侧摩阻力、时间、施加荷载、桩等效半径及渗透系数。确定 $\{D,p_c,k\}$ 3个独立的基本物理量后,可得到软土地基中XCC刚性桩复合地基承载时效性的量纲分析结果,如表3所示。

表3 XCC 刚性桩复合地基承载特性时效性无量纲参数
Table 3 Dimensionless parameters of time-dependent bearing characteristics of XCC rigid pile composite foundation

foundation		
参数	参数	无量纲率
竖向荷载 p	$\frac{[M]}{[L][T]^2}$	$\frac{p}{p_c}$
竖向位移 y	$[L]$	$\frac{y}{D}$
桩土表面竖向位移差 Δy	$[L]$	$\frac{\Delta y}{D}$
桩径 D	$[L]$	
施加荷载 p_c	$\frac{[M]}{[L][T]^2}$	
路堤高度 H_1	$[L]$	$\frac{H_1}{D}$
渗透系数 k	$\frac{[L]}{[T]}$	
XCC 尺寸比 i		$\frac{a}{b}$
桩身长度 L	$[L]$	$\frac{L}{D}$
超孔压 Δu	$\frac{[M]}{[L][T]^2}$	$\frac{\Delta u}{p_c}$
桩身相对高度 H_p	$[L]$	$\frac{H_p}{H_3}$
桩身轴力 F	$\frac{[M][L]}{[T]^2}$	$\frac{F}{p_c D^2}$
侧摩阻力 F_c	$\frac{[M][L]}{[T]^2}$	$\frac{F_c}{p_c D^2}$
时间 t	$[T]$	$\frac{tk}{D}$

3 数值结果及影响因素分析

通过引入复合地基的布桩形式及截面形状、桩间距、路堤填土高度、XCC 尺寸以及桩帽高度 5 种影响因素,开展软土中 XCC 刚性桩复合地基承载特性时效性数值模型研究,得出不同因素对 XCC 刚性

桩复合地基承载时效性的影响。
3.1 布桩形式及截面形状
为研究不同截面形状及布桩形式对复合地基荷载传递时效性的影响,选取等面积条件下的 X 形截面与圆形截面进行分析。布桩形式分别采用矩形布桩与梅花形布桩,两种布置形式如图 1 和图 4 所示。

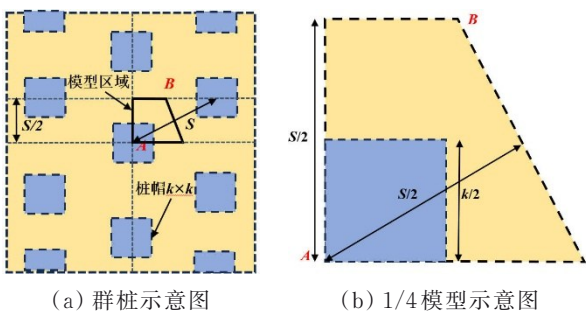


图4 有限元模型平面示意图
Fig. 4 Plan view of finite element model

图5所示为等截面面积条件下不同布桩形式下圆形桩与XCC刚性桩复合地基的归一化路堤表面沉降随时间变化规律。由图5可见,在相同布桩形式下,XCC桩复合地基的路堤表面沉降小于圆形桩复合地基。这是由于等截面条件下XCC桩的侧表面积较大,桩土界面摩阻增强,从而使整体沉降较小。随着时间推移,两种桩型复合地基均在约200 d (归一化时间3.5)左右趋于稳定。对比不同布桩形式,在等面积条件下,矩形布桩的XCC桩路堤沉降幅度略大于梅花形布桩,结果与文献[15]结论一致。

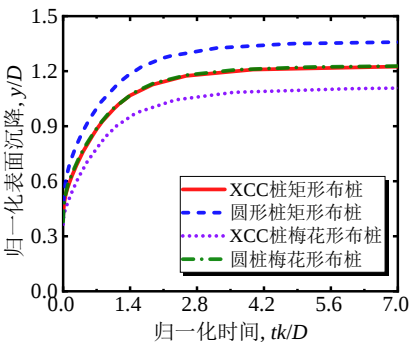


图5 不同布桩形式下表面沉降随时间变化规律
Fig. 5 Variation of surface settlement with time under different pile arrangement patterns

随着时间的增加,不同位置处的超孔压变化规律存在差异,如图6所示。靠近地基表面的超孔压消散速度明显快于桩端附近区域,这是由于刚性桩复合地基的排水固结主要沿竖向进行,越接近地表排水路径越短,孔压消散越快。对比不同截面形状及布桩形式可见,相同位置处的超孔压消散规律基

本一致,说明在等截面条件下,桩形与布桩方式对超孔压消散影响较小^[33]。

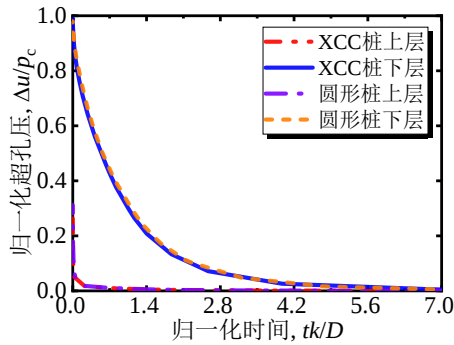


图6 不同布桩形式下超孔压随时间变化规律

Fig. 6 Variation of excess pore pressure with time under different pile layouts

图7所示为不同布桩形式下XCC刚性桩与圆形刚性桩复合地基的桩土应力比随时间的变化规律。由图7可见,所有桩土应力比均随时间增加逐渐上升并最终趋于稳定,这是由于孔隙水压力逐步消散,桩土沉降差减小,垫层与路堤共同分担并调节桩顶及桩间土的应力分布,土拱效应逐渐形成并稳定。对比不同条件可知,在相同布桩形式下,等面积XCC桩的桩土应力比高于圆形桩;而在布桩形式上,梅花形布桩的桩土应力比略小于矩形布桩形式。

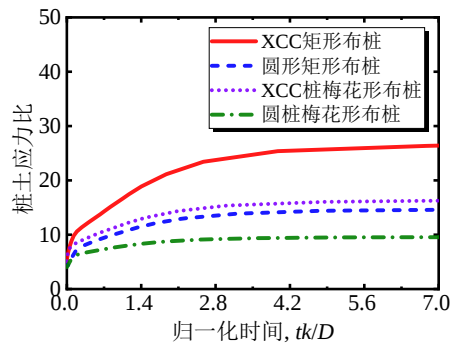
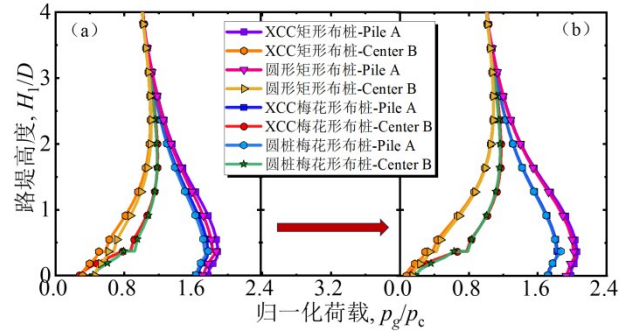


图7 不同布桩形式下桩土应力比随时间变化规律

Fig. 7 Variation of pile-soil stress ratio with time under different pile layouts

图8所示为不同布桩形式下XCC刚性桩与圆形刚性桩复合地基在加载过程中的竖向应力归一化分布规律,其中A点为桩中心位置,B点为桩间土中心位置。由图8可见,荷载施加后路堤内部形成明显的土拱效应,竖向应力在土拱及垫层作用下发生重分布。由于布桩形式差异,矩形布桩的土拱高度高于梅花形布桩。随着时间推移,应力重分布逐渐稳定,在相同布桩条件下,圆形桩与XCC桩的竖向应力值趋于接近,但XCC桩在桩中心位置处的竖向应力略大,而在桩间土中心处略小,说明X形截

面更有利于减小桩间土应力、增强桩体受力,表明XCC刚性桩的应力重分布效果优于圆形桩。



注:(a)为 $t=0d$, (b)为 $t=400d$ 。

图8 不同布桩形式下路堤应力随时间变化规律

Fig. 8 Variation of embankment stress with time under different pile arrangement forms

为更细致地分析桩身侧摩阻力的变化规律,将X形桩的强轴定义为A点,弱轴定义为B点。图9所示为不同布桩形式下XCC刚性桩与圆形刚性桩中性点随时间的变化特征。由图9可见,在相同布桩条件下,XCC桩强轴的中性点位置最高,弱轴最低,而圆形桩介于两者之间。随着时间推移,各桩型的中性点均逐渐出现并上升至最大值,且出现顺序依次为XCC桩强轴、圆形桩和XCC桩弱轴。对比布桩形式可知,梅花形布桩下XCC桩强轴的中性点出现时间早于矩形布桩,而弱轴略晚,圆形桩的中性点变化则基本一致。

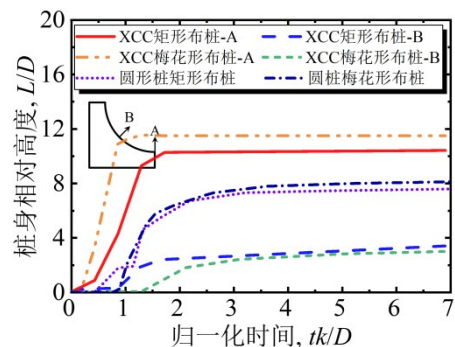


图9 不同布桩形式下中性点随时间变化规律

Fig. 9 Variation of neutral point with time under different pile arrangement forms

总体来看,相较于圆形截面,X形截面在等面积条件下具有更大的周长和多翼缘边界,其桩周侧摩阻力在固结过程中更易被逐步激发,且在翼尖附近形成应力集中和“半封闭土塞”效应,使桩周土体更早参与土拱结构的构成。随着孔压消散和桩土沉降差的发展,XCC桩通过更大的界面面积将路堤荷载持续、稳定地向桩身转移,使桩土应力比随时间上升幅度更大,而桩间土应力和表面沉降相应减小;相比之下,圆形桩因侧阻发展较为均匀且强弱

轴差异不明显,荷载在时间上的再分配能力相对有限。

3.2 桩间距

桩间距是影响刚性桩复合地基承载特性时效变化的重要因素之一。一般情况下,桩间距取桩径的 3~5 倍的桩径($s=3\sim 5D$)。因此,分别建立了桩间距为 3D、4D 和 5D 的 XCC 刚性桩复合地基数值模型,以分析桩间距变化对其承载时效性的影响。

图 10 所示为不同桩间距下 XCC 刚性桩复合地基在 100 kPa 荷载作用下的路堤表面归一化沉降随时间变化规律。由图 10 可见,各模型在约 200 d(归一化时间 3.5)时沉降趋于最大值,且在相同时间节点下,桩间距越大,路堤表面沉降幅度越大。图 11 所示为不同桩间距条件下超孔压的变化规律。由图 11 可见,桩间距增大时,靠近地表的超孔压受影响较小并能在短时间内迅速消散;而桩端附近的超孔压总体消散时间变化不明显,但在 150 d(归一化时间 2.8)之前,随桩间距增大其消散速率逐渐减小。

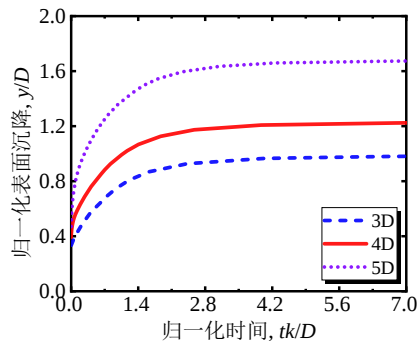


图 10 不同桩间距下表面沉降随时间变化规律

Fig.10 Variation of surface settlement with time under different pile spacings

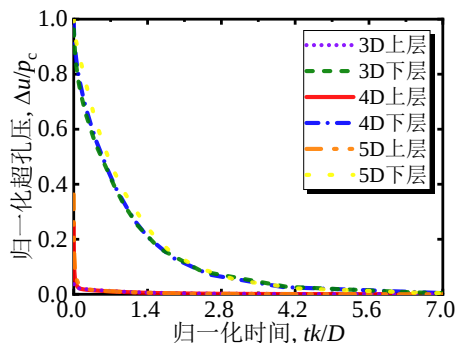


图 11 不同桩间距下归一化超孔压随时间变化规律

Fig.11 Variation of normalized excess pore pressure with time under different pile spacings

图 12 所示为不同桩间距条件下 XCC 刚性桩复合地基桩土应力比随时间的变化规律。由图 12 可见,3 种桩间距下的桩土应力比均随时间逐渐上升并最终趋于稳定,这是由于孔隙水压力逐步消散、

桩土沉降差减小,垫层与路堤共同调节桩顶及桩间土的应力分配,土拱效应逐渐形成并稳定。随着桩间距的增大,桩土应力比整体呈增大趋势,主要原因是桩间距增大导致桩土沉降差加大,褥垫层将更多的荷载传递至桩体,从而致使桩土应力比提高。

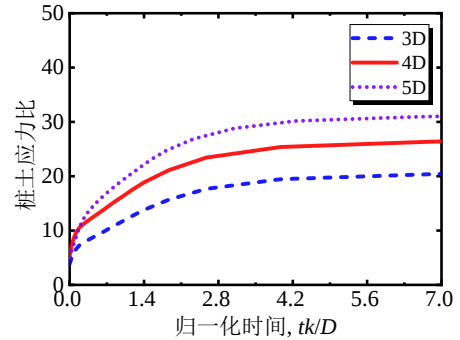
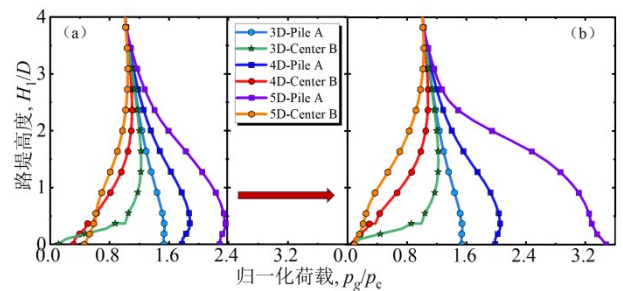


图 12 不同桩间距下桩土应力比随时间变化规律

Fig.12 Variation of pile-soil stress ratio with time under different pile spacings

图 13 所示为不同桩间距条件下路堤及褥垫层沿桩中心位置 A 点与桩间土中心位置 B 点的竖向应力分布变化规律。由图 13 可见,荷载施加瞬间路堤内部即形成土拱结构,且桩间距越大,土拱高度越高。随时间推移,桩间土竖向应力逐渐减小,而桩顶应力不断增大;同时,桩间距越小,应力重分布达到稳定所需时间越短。其原因在于,荷载作用初期桩土产生沉降差,使路堤中的竖向应力发生重新分配;桩间距越大,沉降差越显著,导致土拱效应更强。褥垫层在此过程中发生变形,将上部荷载更有效地传递至桩体。由于桩间距较小时沉降差更快稳定,因此其土拱效应也更早达到平衡。



注:(a)为 $t=0d$, (b)为 $t=400d$ 。

图 13 不同桩间距下路堤归一化应力随时间变化规律

Fig.13 Variation of normalized embankment stress with time under different pile spacings

图 14 所示为 XCC 刚性桩复合地基桩身中性点随时间的变化规律。由图 14 可见,随着桩间距的增大,强轴中性点的相对深度逐渐减小,而弱轴中性点则随之增大;同时,强轴中性点出现时间早于弱轴中性点,且两者的出现时间均随桩间距增大而提前。其原因在于桩间距增大导致桩土沉降差加大,

使桩身侧摩阻力更早发挥作用。随着时间推移,强轴与弱轴的中性点均逐渐上升并最终趋于稳定,表明桩土沉降差趋于平衡。最终结果显示,桩间距越大,强轴中性点稳定深度减小,而弱轴中性点稳定深度增大,说明不同桩间距下XCC刚性桩强、弱轴的受力演化特征存在明显差异。

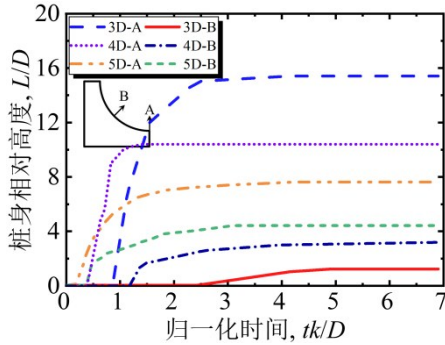


图 14 不同桩间距下中性点随时间变化规律

Fig.14 Variation of neutral point with time under different pile spacings

从机理上看,桩间距控制了XCC桩几何形状诱导的侧摩阻力和土拱效应的发挥程度:当桩间距较小时,桩间土体被多个X形桩“夹持”,在固结早期即可形成稳定土拱,路堤荷载在时间上更快地由桩间土向桩体转移,使桩土应力比较早达到稳定,地基沉降发展相对温和;而当桩间距增大时,桩间土跨度变大,需在更大的沉降差驱动下才能形成完整土拱,导致荷载在固结过程中更长时间地由桩间土承担,从而表现为表面沉降增大、中性点提前上移和桩土应力比持续上升。由于X形桩周长较大、强弱轴侧阻发展不均,其在大桩距条件下对沉降差更为敏感,体现为随时间推移桩身中性点在强、弱轴方向出现明显分化,进一步放大了荷载传递时效性对地基沉降演化的影响。

3.3 路堤高度

路堤作为形成土拱效应的重要载体,对刚性桩复合地基的承载时效性具有显著影响。为进一步分析路堤高度对XCC刚性桩复合地基性能的作用规律,分别建立路堤高度 H_1 为1、2、4、5 m的数值模型,并在100 kPa荷载作用下进行对比分析。

图15所示为不同路堤高度下XCC刚性桩复合地基路堤表面归一化沉降随时间的变化规律。由图15可见,随着路堤高度由1 m增至6 m,路堤表面沉降逐渐增大,并在约200 d时达到最大值,之后趋于稳定。

随着时间的增加,不同位置处的超孔压变化规律存在差异,如图16所示。靠近地表的孔压受路堤高度变化影响较小,均能在短时间内迅速消散;而

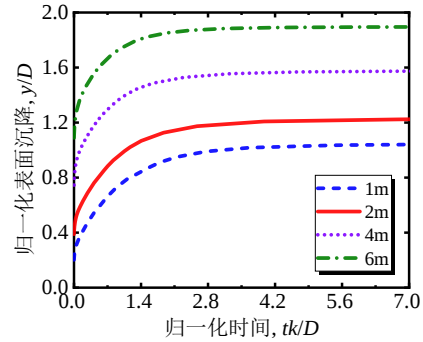


图 15 不同路堤高度下表面沉降随时间变化

Fig.15 Variation of surface settlement with time under different embankment heights

桩端附近的超孔压随路堤高度增加其消散速率明显加快。这是由于路堤高度增大,地基中竖向应力增大,从而加速桩端区域的孔压消散;而地表附近初始孔压较低,路堤高度增加对其竖向荷载影响有限,因此孔压变化相对较小。

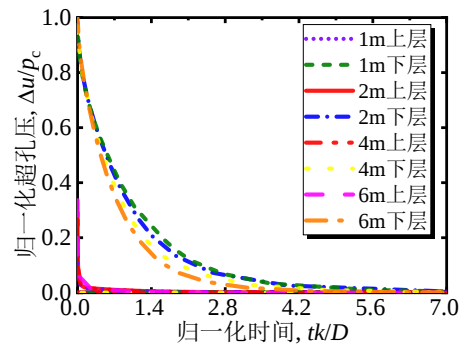


图 16 不同路堤高度下归一化孔压随时间变化规律

Fig. 16 Variation of normalized excess pore pressure with time under different embankment heights

图17所示为不同路堤高度条件下XCC刚性桩复合地基桩土应力比随时间的变化规律。由图17可见,各路堤高度下的桩土应力比均随时间逐渐上升并趋于稳定,这是由于孔隙水压力逐步消散、桩土沉降差减小,垫层与路堤共同调节桩顶及桩间土的应力分布。随着路堤高度的增加,桩土应力比整体呈增大趋势,主要原因在于桩帽高度增加使桩土沉降差加大,褥垫层将更多荷载传递至桩体;但随着外部荷载持续增大,桩土应力比的增长幅度逐渐减缓。

图18所示为不同路堤高度下路堤及褥垫层沿桩中心位置A点和桩间土中心位置B点的竖向应力分布规律。为便于比较,路堤高度与桩的等效直径进行了归一化处理。由图18可见,荷载施加瞬间路堤内部即形成土拱结构,除1 m路堤外,其余3种高度的土拱位置均集中在距垫层约2 m处,且土拱高度随路堤高度变化不明显,这与路堤高度约为桩帽间距1.8倍时的理论分析一致。随时间推移,桩间

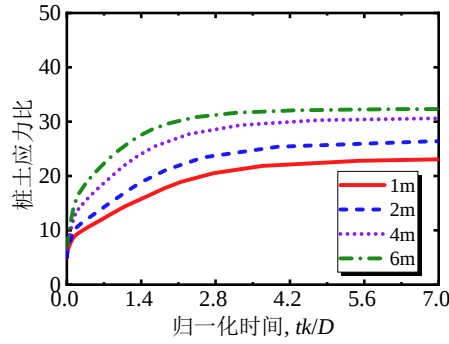
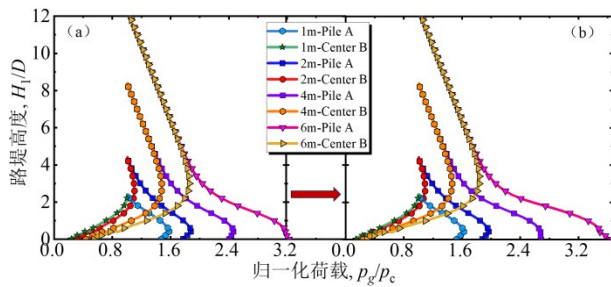


图 17 不同路堤高度下桩土应力比随时间变化规律

Fig.17 Variation of pile-soil stress ratio with time under different embankment heights

土应力逐渐减小,桩顶应力不断增大,且路堤越高,桩中心处应力增幅越大。这是由于较高路堤使桩土沉降差增大,内部竖向应力重分布更为显著;同时,褥垫层在差异沉降作用下发生变形,有效地将上部荷载传递至桩顶,因此路堤高度越大,应力重分布效果越显著。



注:(a)为 $t=0d$, (b)为 $t=400d$ 。

图 18 不同路堤高度下路堤归一化应力随时间变化规律

Fig.18 Variation of normalized embankment stress with time under different embankment heights

图 19 所示为不同路堤高度条件下 XCC 刚性桩中性点随时间的变化规律。由图 19 可见,随着路堤高度增加,强轴中性点的相对深度逐渐减小,而弱轴中性点则随之增大;同时,强轴中性点出现时间早于弱轴中性点,且两者的出现时间均随路堤高度增大而提前。其原因在于,路堤越高,桩土沉降差越显著,桩身侧摩阻力更早发挥作用。随着时间推移,强轴与弱轴中性点均逐步上升并最终趋于稳定,表明桩土沉降差趋于平衡。最终结果显示,路堤高度越大,强轴中性点稳定深度越小,而弱轴中性点稳定深度越大,说明不同路堤高度下 XCC 刚性桩的强、弱轴受力演化特征存在明显差异。

由上述结果可以看出,路堤高度实际上通过改变上覆荷载水平和初始应力场,放大了 X 形截面几何对荷载传递时效性的影响:较高路堤使桩土体系在固结全过程中承受更大的竖向应力,桩间土在更显著的沉降差作用下驱动土拱结构迅速发育并持

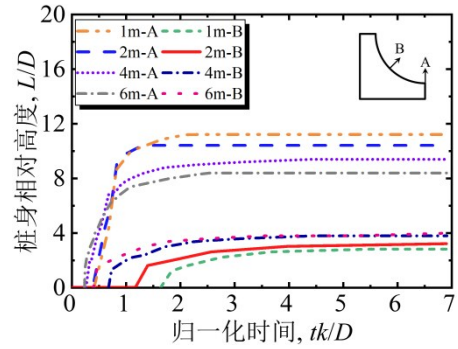


图 19 不同路堤高度下中性点随时间变化规律

Fig.19 Variation of neutral point with time under different embankment heights

续强化,从而促使 XCC 桩周侧摩阻力在时间上更充分地被动员,桩土应力比显著增加,桩顶应力重分布更为集中。由于 X 形桩在强轴方向具有更突出的翼缘与土塞效应,在高路堤工况下强轴中性点更早出现、稳定深度更浅,而弱轴中性点则下移并滞后出现,这种随路堤高度增强的各向异性荷载传递过程,最终表现为路堤越高,整体沉降和桩土沉降差越大,X 形截面对长期沉降控制与荷载分配的几何放大效应越明显。

3.4 XCC 尺寸

XCC 桩作为一种新型异形桩,其截面尺寸参数对复合地基的承载特性具有重要影响。基于 X 形桩的横截面布局,定义短轴长度为 b ,长轴长度为 a ,并取交角为 90° 。在保持截面面积相同的条件下,分别建立长宽比 $i=a/b=3,4,5$ 的 XCC 刚性桩复合地基模型,以分析不同截面比例对其承载性能的影响。

图 20 所示为不同 X 形截面尺寸下 XCC 刚性桩复合地基路堤表面沉降随时间变化规律。由图 20 可见,各模型在约 200 d 时沉降达到最大值;随着长轴尺寸的增大,路堤表面沉降逐渐减小,说明较大的长宽比有助于提升地基整体承载性能并减小沉降。

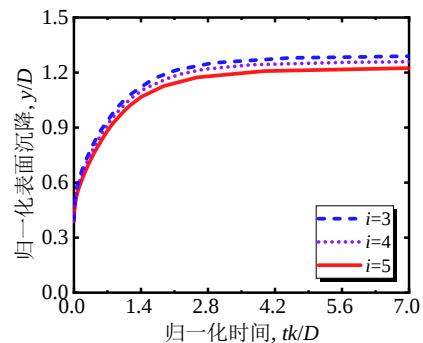


图 20 不同截面尺寸下表面沉降随时间变化

Fig.20 Variation of surface settlement with time under different cross-sectional dimensions

图 21 所示为不同截面尺寸条件下 XCC 刚性桩复合地基桩土应力比随时间的变化规律。由图 21 可见,3 种截面尺寸下的桩土应力比均随时间逐渐上升并最终趋于稳定,这是由于孔隙水压力逐步消散、桩土沉降差减小,垫层与路堤共同调节桩顶及桩间土的应力分布。随着长轴尺寸的增大,桩土应力比略有提高,这是因为桩土沉降差略微增大,使褥垫层更有效地将荷载传递至桩体,但整体变化幅度较小。

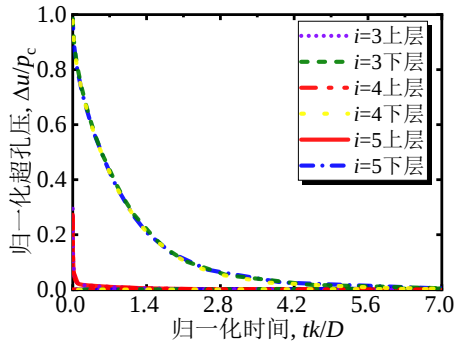


图 21 不同截面尺寸下归一化孔压随时间变化规律
Fig.21 Variation of hole pressure with time under different

随着时间的推移,不同位置处的超孔压变化规律存在明显差异,如图 22 所示。靠近地表的超孔压受影响较小,而桩端附近的超孔压随时间增加其消散速率逐渐加快。对比 3 种不同 X 形截面尺寸可知,相同位置处的超孔压变化差异较小,截面尺寸变化对超孔压消散过程影响不显著,表明刚性桩的截面形状对超孔压的消散规律基本无影响。

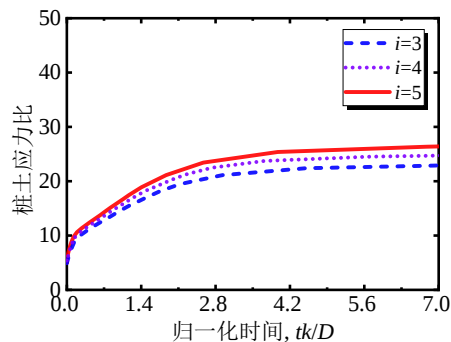
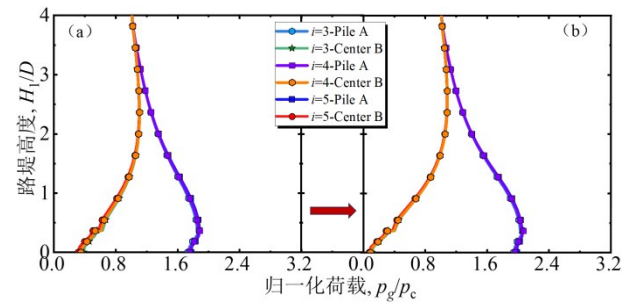


图 22 不同截面尺寸下桩土应力比随时间变化规律
Fig.22 Variation of pile-soil stress ratio with time under different cross-sectional sizes

图 23 所示为不同截面尺寸条件下路堤及褥垫层沿桩中心位置 A 点和桩间土中心位置 B 点的竖向应力分布规律。由图 23 可见,荷载施加瞬间路堤内部即形成土拱结构;随着长轴尺寸的增大,桩中心处的竖向应力略有增加,而桩间土中心处的竖向应力略有减小。这是由于长轴尺寸越大,桩土沉降差

越明显,褥垫层在差异沉降作用下发生变形,能够更有效地将上部荷载传递至桩顶,从而使竖向应力重分布效果略有改善。



注:(a)为 $t=0d$, (b)为 $t=400d$ 。

图 23 不同截面尺寸下路堤归一化应力随时间变化规律
Fig.23 Normalised stress variation rule of embankment with time under different cross-section size

图 24 所示为不同截面尺寸条件下 XCC 刚性桩中性点随时间的变化规律。由图 24 可见,强轴中性点的相对深度随长轴尺寸的增大先增加后减小,表明截面尺寸变化会引起中性点位置的波动,但对强轴方向侧摩阻力的影响较小。随着长轴长度的进一步增大,弱轴中性点位置逐渐降低,这是由于长轴尺寸增大使桩土沉降差加大,弱轴侧摩阻力略有增强,中性点下移。

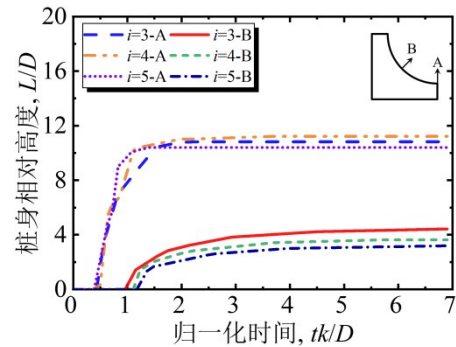


图 24 不同截面尺寸下归一化侧摩阻力随时间变化规律
Fig.24 Variation of normalized lateral friction resistance with time under different cross-sectional sizes

由此可见,XCC 截面长宽比的变化实质上是在调控 X 形几何对侧摩阻力分布和荷载传递路径的放大作用。当长轴尺寸增大时,强轴方向桩周界面长度显著增加,固结过程中该方向侧摩阻力更易被优先动员,使得桩土应力比略有提高、桩中心竖向应力增大、桩间土应力减小,从而在时间尺度上强化了荷载向桩体集聚的趋势,最终表现为表面沉降减小;与此同时,强轴与弱轴中性点的非单调变化,反映出不同长宽比下各向异性侧阻发展节奏的差异。尽管超孔压消散规律对截面尺寸不敏感,但 X 形截面的几何调整改变了在相同固结条件下荷载在桩与土之间的分配效率,说明截面尺寸是控制 X

形桩荷载传递时效性及沉降演化细节的重要几何参数。

3.5 桩帽高度

在实际工程中,桩帽高度的选取对复合地基的承载性能具有重要影响。为探讨桩帽高度对 XCC 刚性桩复合地基承载时效性的作用规律,结合工程实际需求,分别建立桩帽高度为 0.2、0.5、0.75 m 的 XCC 刚性桩复合地基数值模型进行分析。

图 25 所示为不同桩帽高度条件下 XCC 刚性桩复合地基路堤表面沉降随时间的变化规律。由图 25 可见,各模型在约 200 d 时沉降达到最大值;随着桩帽高度的增加,路堤表面沉降逐渐减小,说明较高桩帽能有效分散荷载并减小地基沉降。

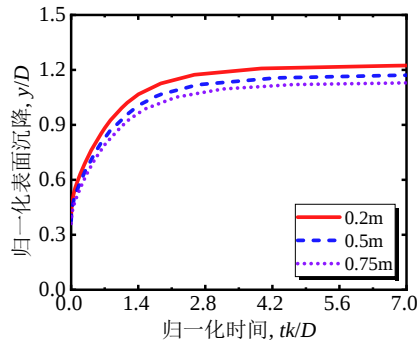


图 25 不同桩帽高度下表面沉降随时间变化

Fig.25 Variation of surface settlement with time under different pile cap heights

随时间推移,不同位置处的超孔压变化趋势存在差异,如图 26 所示。靠近桩端的超孔压随桩帽高度变化几乎不受影响,而靠近地表的超孔压随桩帽高度增加其消散速率逐渐降低。这是由于桩帽高度增加使得上部土层厚度增大,排水路径延长,地表附近孔压消散减缓;而桩端处因深度较大,孔压消散规律变化较小。

图 27 所示为不同桩帽高度条件下 XCC 刚性桩复合地基桩土应力比随时间的变化规律。由图可见,3 种桩帽高度下的桩土应力比均随时间逐渐上

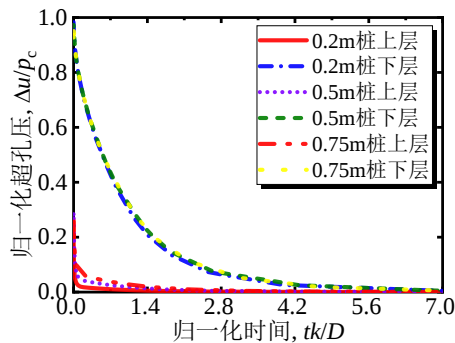


图 26 不同桩帽高度下归一化孔压随时间变化规律

Fig. 26 Variation of normalized excess pore pressure with time under different pile cap heights

升并最终趋于稳定,这是由于孔隙水压力不断消散、桩土沉降差逐渐减小,垫层与路堤共同作用使桩顶与桩间土的应力分布趋于平衡。随着桩帽高度的增加,桩土应力比整体呈上升趋势。这是因为桩帽高度增大后桩帽与土体的接触面积增多,桩土应力传递路径得到强化,使桩顶承受的荷载比例上升,进而导致桩土应力比增大。

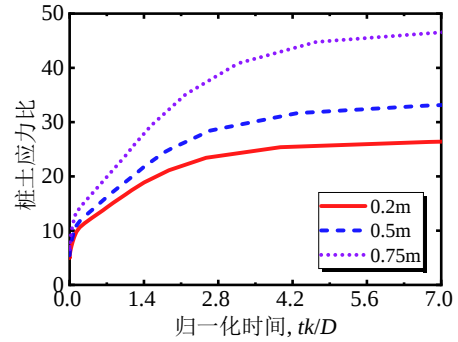
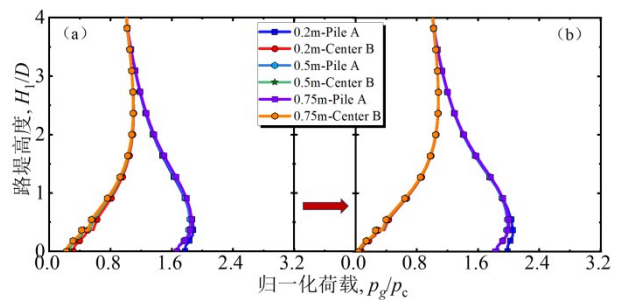


图 27 不同桩帽高度下桩土应力比随时间变化规律

Fig. 27 Variation of pile-soil stress ratio with time under different pile cap heights

图 28 所示为不同桩帽高度下路堤及褥垫层沿桩中心位置 A 点和桩间土中心位置 B 点的竖向应力分布规律。由图 28 可见,荷载施加后路堤内部即形成土拱结构,且随着桩帽高度的增加,A 点和 B 点处的竖向应力在靠近桩体及桩间土区域略有减小,减幅亦略趋缓。这是由于桩帽高度增大使其与周围土体的接触面积增加,产生更多摩擦力,该摩擦力在一定程度上参与褥垫层及路堤中的应力重分布,但总体影响有限。随着时间推移,各模型的竖向应力分布逐渐趋于稳定,桩帽高度对其最终分布影响较小。



注:(a)为 $t=0d$, (b)为 $t=400d$ 。

图 28 不同桩帽高度下路堤归一化应力随时间变化规律

Fig. 28 Variation of normalized embankment stress with time under different pile cap heights

图 29 所示为不同桩帽高度条件下 XCC 刚性桩中性点随时间的变化规律。由图 29 可见,随着桩帽高度的增加,强轴中性点的相对深度随时间变化较小,影响不显著;而弱轴中性点的相对深度则随桩帽高度增加逐渐减小,出现时间也明显推迟,当桩

帽高度达到 0.75 m 时,弱轴中性点未出现。其原因在于桩帽越高,与土体的接触面积越大,界面摩阻增强,使桩体应力分布更为均匀,从而导致中性点出现时间延后、相对深度减小。

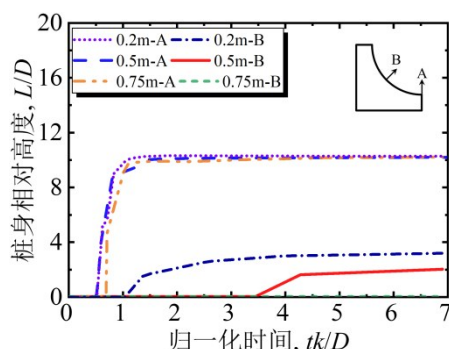


图 29 不同桩帽高度下中性点随时间变化规律

Fig. 29 Variation of neutral point with time under different pile cap heights

从荷载传递机理来看,桩帽高度的增加一方面通过加厚刚性承载板,使上部荷载在平面内分布更均匀,并扩大了桩帽与褥垫层及路堤的接触面积;另一方面又与 X 形桩截面共同作用,在桩帽下方形成更稳定的土拱。随着固结发展,较高桩帽在更大范围内汇聚并向下传递荷载,使 XCC 桩周侧摩阻力在时间上被更充分地激发,桩土应力比持续提高,而桩间土应力和表面沉降得到有效削减;同时,由于桩帽对桩身轴力分布具有“均匀化”作用,弱轴中性点逐渐下移甚至消失,表明异形截面的各向异性在高桩帽条件下更侧重于通过整体荷载集聚而非局部摩阻集中来影响沉降时效性。因此,桩帽高度不仅是控制短期承载分配的重要构造参数,也是调节 X 形桩几何效应在长期荷载传递和地基沉降中发挥程度的关键因素。

4 结论

基于 X 形桩异形对称截面的特点,选取群桩及桩间土的 1/4 简化单元进行三维数值模拟,分别从布桩形式与截面形状、桩间距、路堤填土高度、XCC 桩尺寸及桩帽高度等方面,系统开展了软土地基中 XCC 刚性桩复合地基承载特性时效性的数值分析研究,重点探讨了各参数对承载力时效性规律的影响。现将主要研究内容总结如下:

1) 各工况下路堤表面沉降均在荷载施加瞬间产生,并随时间推移逐渐趋于稳定。与圆形桩相比,XCC 桩可降低整体沉降。随着桩间距、路堤高度及桩帽高度的增加,路堤表面沉降幅度逐渐增大;而当 XCC 桩长轴尺寸增大时,路堤表面沉降则相应减小。

2) 随着时间的推移,不同位置处的超孔压消散速率存在差异,靠近地表的孔压消散明显快于桩端附近。对于刚性桩,截面形状、XCC 尺寸及桩帽高度的变化对超孔压消散影响较小;而桩间距减小或路堤高度增大会加快桩间土中心处孔压的消散速度。

3) 在荷载施加瞬间,路堤内部即形成土拱结构。随时间推移,土拱高度变化较小,但路堤与垫层中的竖向应力在土拱及垫层作用下发生重分布并逐渐趋于稳定。布桩形式与桩间距对土拱效应影响显著,其中矩形布桩及较大桩间距条件下更易形成高度较大的土拱。

4) 各工况下桩土应力比均表现为随时间逐渐上升并最终趋于稳定的规律。在相同条件下,XCC 桩和矩形布桩的桩土应力比均高于圆形桩和梅花形布桩。随着桩间距、路堤高度、XCC 桩长轴尺寸及桩帽高度的增加,桩土应力比相应增大。

5) XCC 刚性桩的强轴中性点出现时间和最终稳定深度均大于弱轴。随时间推移,强轴中性点先于圆形桩及弱轴出现,且在梅花形布桩条件下出现更早。强轴中性点深度随桩间距、路堤高度、桩帽高度及荷载的增加而减小,而弱轴中性点则呈相反变化规律;随着长轴尺寸增大,强轴中性点深度先增后减,弱轴中性点深度则逐渐减小。

参考文献

- [1] 刘芝平, 陈育民. 现浇 X 形混凝土桩模型试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2009, 37(2): 206-210.
Liu Z P, Chen Y M. Model tests of behaviors of X-shaped cast-in-place piles [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2009, 37(2): 206-210. (in Chinese)
- [2] 王智强, 刘汉龙, 张敏霞, 等. 现浇 X 形桩竖向承载特性足尺模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(6): 903-907.
Wang Z Q, Liu H L, Zhang M X, et al. Full scale model tests on vertical bearing characteristics of cast-in-place X-section piles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(6): 903-907. (in Chinese)
- [3] 张敏霞, 刘汉龙, 丁选明, 等. 现浇 X 形混凝土桩与圆形桩承载性状对比试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(9): 1469-1476.
Zhang M X, Liu H L, Ding X M, et al. Comparative tests on bearing capacity of cast-in-situ X-shaped concrete piles and circular pile [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(9): 1469-1476. (in Chinese)
- [4] 袁估. X 形桩水平承载性能足尺模型试验研究[D]. 南京: 河海大学, 2009.

- Yuan J. Full-scale model test study on horizontal bearing performance of X-shaped piles [D]. Nanjing: Hohai University, 2009. (in Chinese)
- [5] 张敏霞, 刘汉龙, 丁选明, 等. 现浇 X 形混凝土桩竖向承载性状模型试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(2): 389-394.
- Zhang M X, Liu H L, Ding X M, et al. Model test of vertical bearing capacity of cast-in-situ X-shaped concrete piles [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(2): 389-394. (in Chinese)
- [6] 张敏霞, 丁选明, 陈育民. 现浇 X 形混凝土桩竖向承载特性试验及其极限承载力预测[J]. 煤炭学报, 2011, 36(2): 267-271.
- Zhang M X, Ding X M, Chen Y M. Test on vertical behavior of cast-in-situ X-shaped concrete pile and its ultimate bearing capacity prediction [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(2): 267-271. (in Chinese)
- [7] 张敏霞. 现浇 X 形桩单桩竖向承载形状足尺模型试验与计算方法研究[D]. 南京: 河海大学, 2011.
- Zhang M X. Full-scale model test and calculation method study on vertical bearing behavior of single cast-in-situ X-shaped pile [D]. Nanjing: Hohai University, 2011. (in Chinese)
- [8] 刘汉龙, 金辉, 丁选明, 等. 现浇 X 形混凝土桩沉桩挤土效应现场试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(增刊 2): 219-223, 228.
- Liu H L, Jin H, Ding X M, et al. Field test research on squeezing effects of X-section cast-in-place concrete pile [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(Sup 2): 219-223, 228. (in Chinese)
- [9] 杨挺, 刘汉龙, 孔纲强. 现浇 X 形桩复合地基静载荷试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(3): 662-669.
- Yang T, Liu H L, Kong G Q. Static load field test of X-section cast-in-place pile composite foundation [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(3): 662-669. (in Chinese)
- [10] Lv Y R, Ding X M, Liu H L. In situ tests on cast-in-place concrete X-section pile for bearing capacity of single-pile composite foundation [C]//Sevi A F, Liu J Y, Chen C W, et al. Advances in Pile Foundations, Geosynthetics, Geoinvestigations, and Foundation Failure Analysis and Repairs. Hunan, China. Reston: ASCE, 2012: 39-47.
- [11] 吕亚茹, 丁选明, 孙甲, 等. 刚性荷载下现浇 X 形桩复合地基极限承载力特性研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(9): 2691-2696, 2703.
- Lü Y R, Ding X M, Sun J, et al. Analysis of ultimate bearing capacity of X-section cast-in-place concrete pile composite foundation under rigid load [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(9): 2691-2696, 2703. (in Chinese)
- [12] Lv Y R, Liu H L, Ding X M, et al. Field tests on bearing characteristics of X-section pile composite foundation [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2012, 26(2): 180-189.
- [13] 丁选明, 孔纲强, 刘汉龙, 等. 现浇 X 形桩桩-土荷载传递规律现场试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(2): 489-493.
- Ding X M, Kong G Q, Liu H L, et al. Field test study of pile-soil load transfer characteristics of X-shaped cast-in-place pile [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(2): 489-493. (in Chinese)
- [14] 孔纲强, 刘汉龙, 丁选明, 等. 现浇 X 形桩复合地基桩土应力比及负摩阻力现场试验[J]. 中国公路学报, 2012, 25(1): 8-12, 20.
- Kong G Q, Liu H L, Ding X M, et al. Field test of pile-soil stress ratio and negative skin friction of composite X-section cast-in-place pile foundation [J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(1): 8-12, 20. (in Chinese)
- [15] 周航, 亓戈平, 陈荣淋. 软土中 XCC 刚性桩复合地基承载特性时效性研究[J]. 中国公路学报, 2024, 37(6): 132-143.
- Zhou H, Qi G P, Chen R L. Study on time effect of bearing characteristics of XCC rigid pile composite foundation in soft soil [J]. China Journal of Highway and Transport, 2024, 37(6): 132-143. (in Chinese)
- [16] 胡文强, 周航, 刘汉龙. XCC 桩群桩沉桩挤土效应透明土模型试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2024, 46(6): 107-115.
- Hu W Q, Zhou H, Liu H L. Experimental study of XCC pile group penetration effect based on transparent soil model testing technique [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2024, 46(6): 107-115. (in Chinese)
- [17] 费康. 现浇混凝土薄壁管桩的理论与实践[D]. 南京: 河海大学, 2004.
- Fei K. Theory and practice of thin-wall pipe pile using cast-in-situ concrete [D]. Nanjing: Hohai University, 2004. (in Chinese)
- [18] Zhou H, Liu H L, Yuan J R, et al. Numerical simulation of XCC pile penetration in undrained clay [J]. Computers and Geotechnics, 2019, 106: 18-41.
- [19] Han J, Gabr M A. Numerical analysis of geosynthetic-reinforced and pile-supported earth platforms over soft soil [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128(1): 44-53.
- [20] 朱世哲, 徐日庆, 杨晓军, 等. 带垫层刚性桩复合地基桩土应力比的计算与分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(5): 814-817, 823.
- Zhu S Z, Xu R Q, Yang X J, et al. Computation and analysis of ratio of pile stress to soil stress of rigid pile composite foundation with cushion [J]. Rock and Soil

- Mechanics, 2004, 25(5): 814-817, 823. (in Chinese)
- [21] 汪凯, 邓正宇, 陈云, 等. 刚性桩复合地基桩土应力比计算方法研究[J]. 土工基础, 2017, 31(1): 73-79.
Wang K, Deng Z Y, Chen Y, et al. Study of the stress ratio between column and soil in the composite ground improved by the rigid columns [J]. Soil Engineering and Foundation, 2017, 31(1): 73-79. (in Chinese)
- [22] Randolph M F, Wroth C P. Analysis of deformation of vertically loaded piles [J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1978, 104(12): 1465-1488.
- [23] Randolph M F, Wroth C P. An analysis of the vertical deformation of pile groups [J]. Géotechnique, 1979, 29 (4): 423-439.
- [24] 缪林昌, 王非, 吕伟华. 刚性桩复合地基的桩土应力比计算方法[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(6): 1270-1274, 1280.
Miao L C, Wang F, Lv W H. Calculation method of stress concentration ratio of pile to soil of rigid pile composite foundation [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(6): 1270-1274, 1280. (in Chinese)
- [25] 刘明泉, 李晓芝, 刘春原. 带桩帽的刚性桩复合地基受力性能研究[J]. 施工技术, 2016, 45(22): 95-98.
Liu M Q, Li X Z, Liu C Y. Mechanical properties study of capped rigid pile composite foundation [J]. Construction Technology, 2016, 45(22): 95-98. (in Chinese)
- [26] Lee C J, Ng C W W. Development of downdrag on piles and pile groups in consolidating soil [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130(9): 905-914.
- [27] Lee C J, Bolton M D, Al-Tabbaa A. Numerical modelling of group effects on the distribution of dragloads in pile foundations [J]. Géotechnique, 2002, 52(5): 325-335.
- [28] Comodromos E M, Bareka S V. Evaluation of negative skin friction effects in pile foundations using 3D nonlinear analysis [J]. Computers and Geotechnics, 2005, 32(3): 210-221.
- [29] 鲍宁. 桩网结构路基三维土拱效应离散元数值分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
Bao N. Discrete numerical modelling of 3D soil arching effect in geosynthetic-reinforced pile-supported embankments [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020. (in Chinese)
- [30] 陈力恺. 现浇 X 形桩复合地基负摩阻力特性有限元分析[J]. 路基工程, 2021(1): 151-157.
Chen L K. Finite element analysis of characteristics of negative friction of cast-in-place X-section pile composite foundation [J]. Subgrade Engineering, 2021(1): 151-157. (in Chinese)
- [31] Wang L Z, Wang H, Zhu B, et al. Comparison of monotonic and cyclic lateral response between monopod and tripod bucket foundations in medium dense sand [J]. Ocean Engineering, 2018, 155: 88-105.
- [32] 吴一凡. 静动荷载作用下悬浮桩桩承式路堤土拱效应形成机理研究[D]. 南京: 东南大学, 2021.
Wu Y F. Study on the formation mechanism of soil arching effect of floating pile-supported embankment under static and dynamic loads [D]. Nanjing: Southeast University, 2021. (in Chinese)
- [33] 亓戈平, 周航. XCC 桩复合地基固结特性分析[J]. 土木工程学报, 2023, 56(增刊 1): 43-54.
Qi G P, Zhou H. Consolidation characteristics of XCC pile composite foundation [J]. China Civil Engineering Journal, 2023, 56(Sup 1): 43-54. (in Chinese)

(编辑 XXX)