

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20210727004

雪花形钢板桩桩身变形影响因素研究*

徐中权, 高磊, 张峻玮, 王权, 张振雷

(河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏南京 210024)

摘要:雪花形钢板桩是一种新型异型桩,为研究其在荷载作用下桩身变形特征,开展了雪花形钢板桩桩身变形数值模拟与室内模型试验研究,采用有限差分软件FLAC 3D构建雪花形钢板桩数值分析模型,并与室内模型试验结果进行对比,验证了数值模型建立的合理性;同时研究了雪花形钢板桩翼缘数量、腹板(翼缘)厚度、腹板(翼缘)长度、桩长和钢板弹性模量对桩身变形的影响。结果表明:在竖向荷载作用下,雪花形钢板桩桩身应变随着深度增加而减小;增加雪花形钢板桩翼缘数量可以减小最大受力及改善桩体受力的均匀性;在相同条件下,雪花形钢板桩桩身应变随着腹板(翼缘)厚度增大而减小,随着腹板(翼缘)长度增大而减小,随着钢板弹性模量的增大而减小;随着桩长增长,距桩顶相同位置处的桩身应变不断增大,但最大应变大小一致发生在桩顶处。

关键词:雪花形钢板桩; 桩身变形; 竖向荷载; 数值模拟; 模型试验

中图分类号: TU441 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)03-0550-09

Study on Influencing Factors of Deformation of Snowflake Shaped Steel Sheet Pile

XU Zhongquan, GAO Lei, ZHANG Junwei, WANG Quan, ZHANG Zhenlei

(Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China)

Abstract: Snowflake-shaped steel sheet piles are a new type of special-shaped pile. To study their deformation characteristics under load, numerical simulations and laboratory model test were carried out. The finite difference software FLAC3D was used to construct the numerical analysis model of the snowflake-shaped steel sheet pile, and the validity of the numerical analysis is verified by the results of the laboratory model test. At the same time, the influences of flange number, web (flange) thickness, web (flange) length, pile length, and steel plate elastic modulus on pile deformation are studied. The results show that under vertical loads, the strain of the snowflake-shaped steel sheet pile decreases with increasing depth. Increasing the number of flanges of the snowflake-shaped steel sheet pile can reduce the maximum stress and improve the uniformity of the pile force. Under the same conditions, the strain of the snowflake-shaped steel sheet pile decreases with increasing thickness and length of web (flange), as well as the increasing elastic modulus of the steel plate. With the increase of pile length, the strain of the pile shaft at the same position from the pile top increases, but the maxi-

* 收稿日期:2021-07-27;修回日期:2021-10-13

基金项目:国家自然科学基金(52027812)、中央高校基本科研业务费专项资金(B210202047)资助

作者简介:徐中权(1997—),男,硕士研究生。主要从事桩基础研究。E-mail:3338395161@qq.com

通讯作者:高磊(1984—),男,副教授,博士。主要从事环境岩土方面的研究。E-mail:gaoleihhu@hhu.edu.cn

mum strain remains the same, which occurs at the pile top.

Keywords: snowflake shaped steel sheet pile; pile deformation; vertical load; numerical simulation; model test

0 引言

桩是最常见的基础加固形式,其截面形式多种多样,有方形、圆形、三角形等。近年来,随着基础设施建设领域对于节能减排和绿色环保的要求越来越高,一些新型异形桩逐步得到应用^[1-8],在相同承载力情况下,异形桩可以减少材料使用,具有良好经济效益。

雪花形钢板桩技术是由河海大学岩土工程研究所研发的具有自主知识产权的地基处理专利技术(专利号:ZL201810192602.X)^[9]。其结构示意图如图1所示,桩身截面是由三个夹角为120°的Y形组成的雪花形,轴心对称的星形设计增加了钢板桩的整体刚度,可以有效控制桩体变形。与现有的各种桩相比,雪花形钢板桩具有更大比表面积,可以充分发挥桩侧摩阻力作用;施工具有显著环保效果,减小了天然土和混凝土的使用量,有效保护土地资源;并能用于救灾抢险,可以迅速打入土层,方便重型机械迅速进场;同时施工简单,工期较短,且对于施工便道等临时工程可实现循环利用;钢材自身强度高,能够较好打入坚硬土层而桩身不被破坏;同时雪花形钢板桩节约材料,可以现场焊接,方便运输且制作简便,加固面积大,非常适用于桥头跳车、不均匀沉降、软土地基加固以及抢险应急施工等工程,能够充分发挥桩的承载能力。

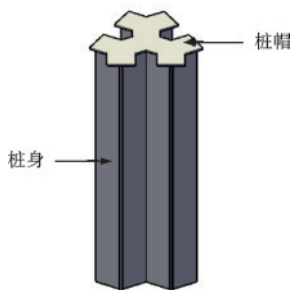


图1 雪花形钢板桩结构示意图

Fig.1 Structural diagram of the snowflake-shaped steel sheet pile

目前,国内外学者对于异形桩做了大量数值模拟和模型试验研究。吕亚茹等^[10]建立了三维X形桩和圆形桩单桩复合地基计算模型,对比分析了两

种桩型的侧摩阻力分布特点和侧阻承载能力的差异。张德华等^[11]开展了DX嵌岩桩破坏性模型试验,对其荷载沉降变形特性、桩周岩体附加应力分布规律进行分析,并结合现场试验,建立三维数值模型,对加载过程中桩周最大主应力分布及塑性区演化过程进行分析。王新泉等^[12]研究在路堤荷载分级加载过程中,Y形桩、圆形桩和方形桩三种桩型的盖板顶沉降、桩间土沉降、盖板顶和桩间土差异沉降、盖板顶平均应力、桩底平均应力等的变化规律。崔允亮等^[13]分析了在竖向荷载作用下钢管桩竖向应变沿深度的分布规律及钢管复合桩钢管厚度对桩基承载性能的影响。L.Chen等^[14]通过分析单个DX桩承载力,研究结果表明DX桩的大部分载荷由分支承担。高磊等^[15]运用有限差分软件FLAC 3D建立X形桩数值分析模型,研究了土与接触面单元的黏聚力和内摩擦角对X形桩桩顶沉降和桩身变形的影响。

为了研究雪花形钢板桩变形特性,开展雪花形钢板桩数值模拟与室内模型试验研究,通过有限差分软件FLAC 3D建立雪花形钢板桩单桩模型,分析竖向荷载作用下雪花形钢板桩桩身应变沿桩长的变化规律,讨论了翼缘数量、腹板(翼缘)厚度、腹板(翼缘)长度、桩长和桩身弹性模量等因素对雪花形钢板桩桩身变形的影响。

1 雪花形钢板桩数值计算模型

为了验证雪花形钢板桩数值分析模型和参数选取的合理性,首先建立一个与室内模型试验相同尺寸的雪花形钢板桩数值模型,对比数值模拟结果与模型试验结果,验证计算参数选取的合理性。

模拟过程中将桩体视为均质各向同性的线弹性体;土体视为弹塑性材料,服从Mohr-Coulomb准则。土体和桩体的力学参数同模型试验中砂土和钢板桩的力学参数一样。图2为模型的网格划分情况,整个模型一共有13 566个网格单元,14 640个网格节点,其中土体模型12 738个网格单元,13 002个网格节点;桩体模型828个网格单元,1 638个网格节点,土体网格内密外疏。

为了更好地模拟桩与土体的接触行为和桩土之

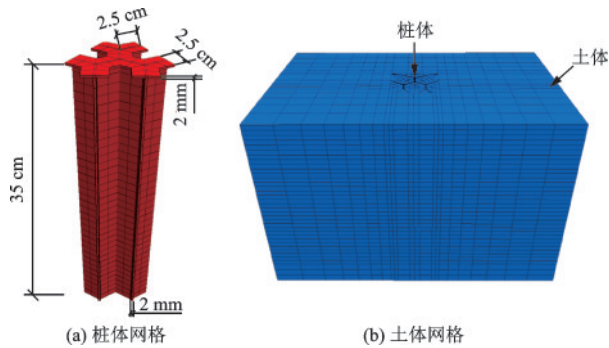


图2 模型网格划分

Fig.2 Meshing of the model

间的错动,更准确分析桩的荷载传递规律,采用 interface 语句在桩与土体之间建立接触面单元。本模型中的接触面采用无厚度的接触面单元,接触面单元由一系列三节点的三角形单元构成,接触面被附加到桩与土接触的区域表面。接触面的力学参数主要有法向刚度 K_n 、切向刚度 K_s 、黏聚力 c 以及内摩擦角 φ 。桩土界面发生破坏时,通常是桩周土破坏而引起界面滑移,因此,接触面单元的力学参数主要取决于桩周土的力学参数。陈育民等^[16]在其著作中指出,无法通过试验获得桩土接触面参数时,黏聚力 c 和内摩擦角 φ 可以取所在土层对应参数的 0.5~0.8 倍,接触面刚度系数 K_n 和 K_s 可以通过公式 (1) 计算得出。接触面的具体力学参数见表 1。

$$K_n = K_s = 10 \max \left[\frac{\left(K + \frac{4}{3} G \right)}{\Delta Z_{\min}} \right] \quad (1)$$

式中, K 为接触面周围最大体积模量; G 为接触面周围最大剪切模量; ΔZ_{\min} 为接触面法向连接区域上的最小尺寸。

表 1 桩土接触面力学参数

Table 1 Mechanical parameters of the pile-soil interface

法向刚度	切向刚度	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
2.247e13	2.247e13	0	15

土体的下边界采用固定约束,在 x 、 y 、 z 三个方向上均无位移;土体四周边界均采用水平约束,在 x 、 y 方向无位移,仅在 z 方向即桩长方向有位移;土体顶面和雪花形钢板桩顶面为自由面,没有约束。

2 数值模型验证试验

验证试验是在一个内壁尺寸为 60 cm ×

40 cm × 40 cm 的有机玻璃模型槽内进行,利用高精度的分布式光纤传感技术对雪花形钢板桩模型桩桩身应变进行监测,加载采用加砝码的方式逐级进行,每级增量 10 kg,最大加载质量为 60 kg。该试验的整体设计示意如图 3 所示。

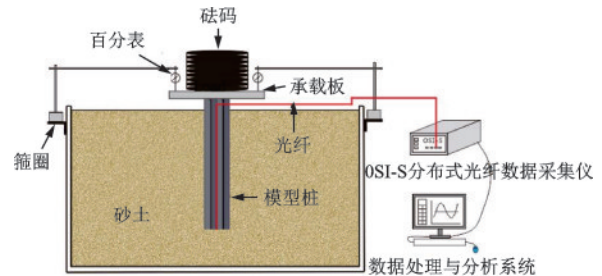


图3 试验整体设计示意

Fig.3 Schematic diagram of the overall test design

2.1 试验土样

对于试验土样,考虑到室内试验的可操作性,为了方便填埋,选用砂土作为桩周土,其主要力学参数见表 2。

表 2 土体力学参数

Table 2 Mechanical parameters of soil

土体	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/ MPa	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/(°)
细砂土	1 600	8	0.2	0	30

2.2 模型桩

试验所用的模型桩钢材为准钢号 C45E4,设计高度为 35 cm,翼缘和腹板的长度为 2.5 cm,由 3 个等边星形腹板结构组合而成,星形结构角度等分,夹角为 120°。为了保证在上部荷载作用下,桩体结构不易发生扭曲破坏,在桩体上部加一个桩帽。桩帽形状与桩体形状相同,均为雪花形,夹角为 120°,桩帽厚度与钢板桩桩体厚度相同,均为 2 mm。模型桩各部位尺寸示意如图 2 所示。

2.3 试验过程

首先在模型桩桩身腹板与腹板交界处布设一根光纤,并利用环氧树脂胶进行封装固定。待胶水完全凝固后,将模型桩竖直放在模型槽中并进行填埋,填埋完成后将砂面整平并安装百分表。最后进行荷载施加和数据采集。光纤的布设及砂土的填

埋分别如图4和图5所示。

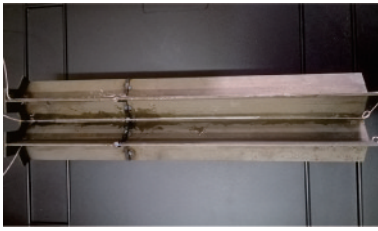


图4 光纤布设

Fig.4 Layout of optical fibers

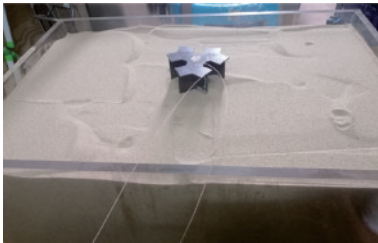
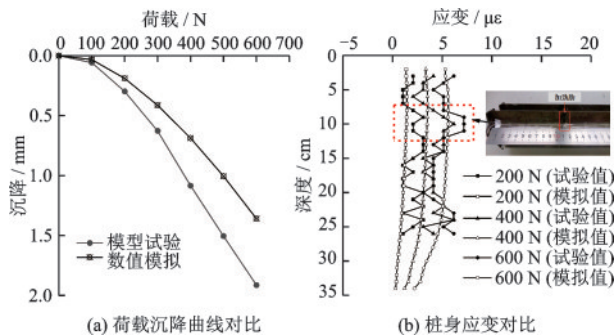


图5 模型桩埋设

Fig.5 Embedding of the model pile

2.4 验证结果分析

为了验证数值模型和参数合理性,将室内模型试验与数值模拟的结果进行对比分析。图6为数值模拟和模型试验荷载—沉降和桩身应变分布对比图。如图6所示,二者曲线变化规律基本一致且数值接近,误差在合理范围内。说明数值模型参数选取和模型建立合理。从图6(b)中可以发现试验值存在明显曲折,其主要原因有两点:一是模型桩在距桩顶约11 cm处焊有加劲肋,导致在11 cm上下的范围内光纤被加劲肋顶起,此时该段光纤没有与桩身紧密贴合,该段光纤的受力与桩体实际受力存在偏差。二是光纤布设时未能完全保证光纤与桩体完全紧密贴合。



(a) 荷载沉降曲线对比 (b) 桩身应变对比

图6 数值模拟与模型试验结果对比

Fig.6 Comparison between numerical simulations and model test results

3 雪花形钢板桩桩身变形影响因素分析

为了更全面地了解雪花形钢板桩的变形特性,对影响雪花形钢板桩桩身变形的因素开展研究,为雪花形钢板桩后期的优化设计提供参考。下面采用控制变量法进行分析和讨论,从雪花形钢板桩翼缘数量、腹板(翼缘)厚度、腹板(翼缘)长度、桩长和桩弹性模量等因素入手,研究其对雪花形钢板桩桩身变形的影响,具体工况信息见表3。数值模拟工况中的土体力学参数见表4。

桩土接触面力学参数的选取方法同第1节,由于各工况中桩体参数有所不同,导致接触面也有所区别,各工况对应的接触面力学参数见表5。

3.1 翼缘数量的影响

在保证雪花形钢板桩结构合理的基础上,对不

表3 数值模拟工况

Table 3 Working conditions for numerical simulation

影响因素	工况	翼缘对数	腹板(翼缘)厚度/m	腹板(翼缘)长度/m	桩长/m	桩弹性模量/GPa
翼缘对数	1	0				
	2	1				
	3	2	0.03	0.25	10	206
	4	3				
腹板(翼缘)厚度	5		0.02			
	6		0.03			
	7	3	0.04	0.25	14	206
	8		0.05			
腹板(翼缘)长度	9			0.15		
	10			0.25		
	11	3	0.03	0.35	14	206
	12			0.45		
桩长	13				11	
	14				14	
	15	3	0.03	0.25	17	206
	16				20	
钢板弹性模量	17					126
	18					166
	19	3	0.03	0.25	14	206
	20					246

表 4 土体材料力学参数

Table 4 Mechanical parameters of soil

材料类别	密度/ (kg·m ⁻³)	弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩擦角/(°)
土体	1 600	10	0.3	10	30

表 5 桩土接触面力学参数

Table 5 Mechanical parameters of the pile-soil interface

工况	法向刚度	切向刚度	黏聚力/ kPa	内摩擦角/(°)
1~16	2.247e13	2.247e13		
17	1.374e13	1.374e13		
18	1.811e13	1.811e13	5	15
19	2.247e13	2.247e13		
20	2.683e13	2.683e13		

同翼缘数量的雪花形钢板桩进行模拟计算,研究不同翼缘对其受力和变形的影响,最终确定雪花形钢板桩的翼缘数量。

图 7 为不同翼缘数量的雪花形钢板桩在 500 kN 荷载作用下桩顶截面处应力分布情况,由图 7(a)可知,无翼缘时,最小应力发生在腹板与腹板交界处,最大应力发生在其中一个腹板的最外端,由腹板与腹板交界处向外,应力在不断增大;由图 7(b)可知,在只有一对翼缘时,最小应力发生在腹板与腹板或腹板与翼缘交界处的外部,最大应力发生在有翼缘的腹板中部(即该结构的几何中心),应力在桩顶截面处的分布规律整体上是几何中心向外不断减小,到最边缘处再增大;由图 7(c)可知,有两对翼缘时,最小应力主要发生在有翼缘的两个腹板上,且

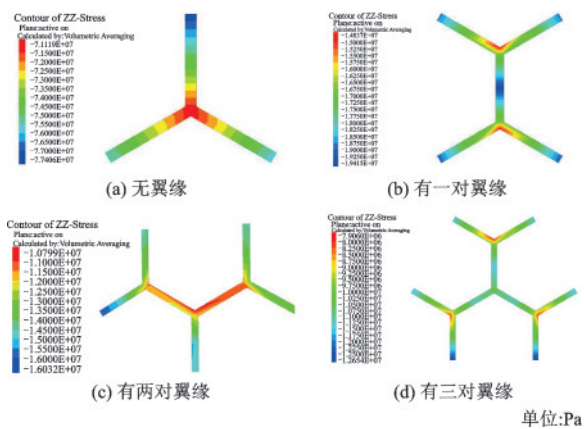


图 7 不同翼缘数量时桩顶截面竖向应力分布

Fig. 7 Vertical stress distribution of the pile top section with varying flange numbers

这两个腹板上的应力整体上都较小,最大应力发生在一个翼缘的外端,应力在桩顶截面处的分布规律整体上是存在翼缘的腹板向外不断增大;由图 7(d)可知,最小应力发生在三个腹板与翼缘交界处的外部,最大应力发生在翼缘最外端,应力在桩顶截面处的分布规律整体上是三个腹板与翼缘交界处向外延伸不断增大,但增大的幅度整体不是很大。

从应力大小和分布均匀性来看,在桩顶施加相同压强时,三个腹板都有翼缘时,桩顶截面内受到的应力最大值较小且整个截面的应力分布最为均匀,没有翼缘时应力值最大且应力分布最不均匀。可见,增加翼缘数量可以减小桩体受力及改善桩体受力的均匀性,使整个截面高效分担桩顶受到的荷载,从而增强桩体安全性。结合模拟结果,再综合考虑钢板桩制作的工艺及成本,最终确定雪花形钢板桩的结构为三腹板都存在翼缘。

图 8 为 500、1 000、1 500、2 000 kN 竖向荷载作

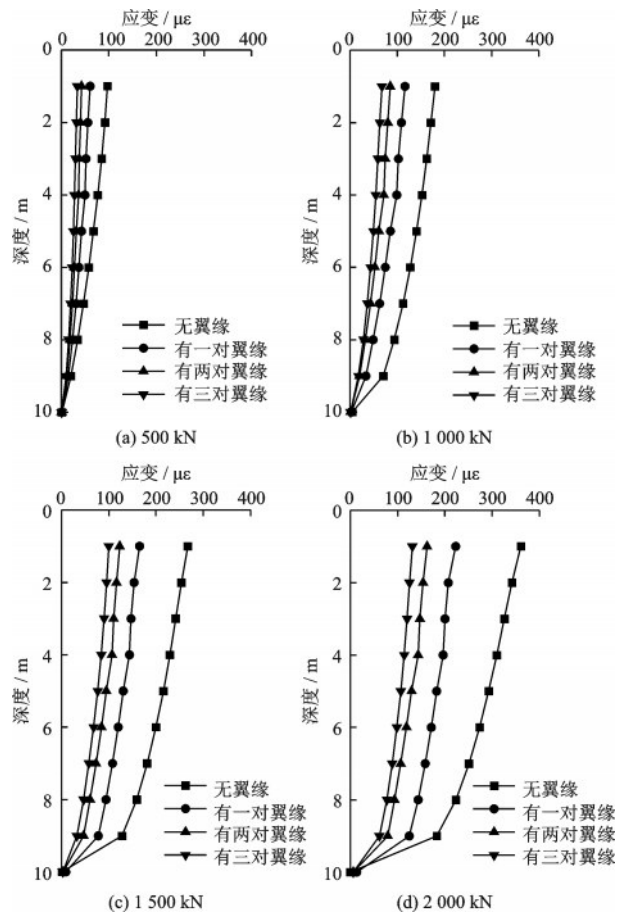


图 8 不同翼缘数量时桩身应变分布对比

Fig. 8 Comparison of strain distribution along the pile shaft for varying flange numbers

用下不同翼缘数量的雪花形钢板桩腹板与腹板交界处桩身应变的对比,如图所示,有不同翼缘数量的雪花形钢板桩在不同竖向荷载作用下的桩身应变分布规律基本一致。桩身应变都是在桩顶处最大,随着深度的增加,桩身应变逐渐减小,且随着桩的埋深增加,桩身应变减小的速率逐渐增大。相同荷载作用下,随着翼缘数量的增加,相同位置处的桩身应变不断减小,减小速率也逐渐降低。随着荷载增加,桩身应变变化一致,都在不断增加,且有不同翼缘数量的雪花形钢板桩之间桩身应变差也在增大,但桩底处桩身应变基本保持不变,一直接近0。

3.2 腹板(翼缘)厚度的影响

为探究腹板(翼缘)厚度(即钢板桩厚度)对桩身变形的影响,分别选取2、3、4以及5 cm的不同厚度进行数值模拟。图9为500、1 000、1 500、2 000 kN竖向荷载作用下不同腹板(翼缘)厚度下的桩身应变对比。

如图9所示,不同腹板(翼缘)厚度的雪花形钢板桩在不同竖向荷载作用下的桩身应变分布规律基本一致。桩身应变都是在桩顶处最大,随着深度的增加,桩身应变逐渐减小,且随着桩的埋深增加,桩身应变减小的速率逐渐增大。相同荷载作用下,随着腹板(翼缘)厚度增加,相同位置处的桩身应变不断减小,减小速率也逐渐降低。随着荷载增加,桩身应变变化一致,都在不断增加,且不同腹板(翼缘)厚度的雪花形钢板桩之间桩身应变差也在增大。

3.3 腹板(翼缘)长度的影响

为探究腹板(翼缘)长度对桩身变形的影响,分别选取15、25、35以及45 cm的不同长度进行数值模拟。图10为500、1 000、1 500、2000 kN竖向荷载作用下不同腹板(翼缘)长度的桩身应变对比。

如图10所示,桩身应变都是在桩顶处最大,随着深度增加,桩身应变逐渐减小,且减小的速率逐渐增大。相同荷载作用下,随着腹板(翼缘)长度的增长,相同位置处的桩身应变不断减小。随着荷载增加,桩身应变变化一致,都在不断增加,且不同腹板(翼缘)长度的雪花形钢板桩之间桩身应变差也在增大,应变分布曲线不断趋于平缓。

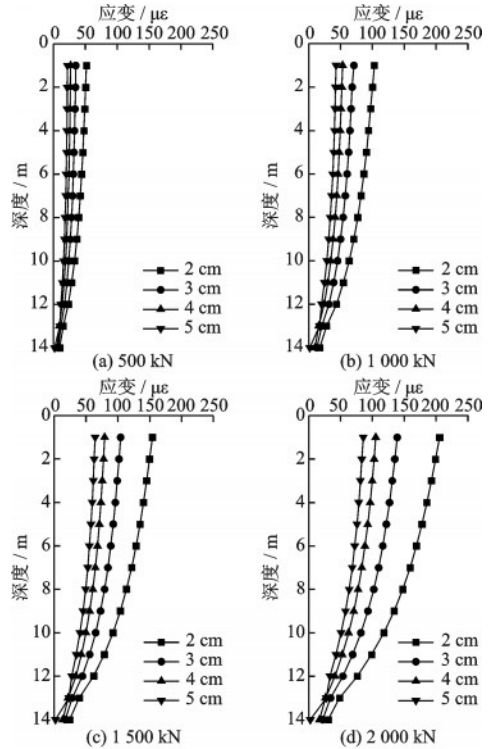


图9 不同腹板(翼缘)厚度下桩身应变分布
Fig.9 Strain distribution along the pile shaft for varying web (flange) thickness

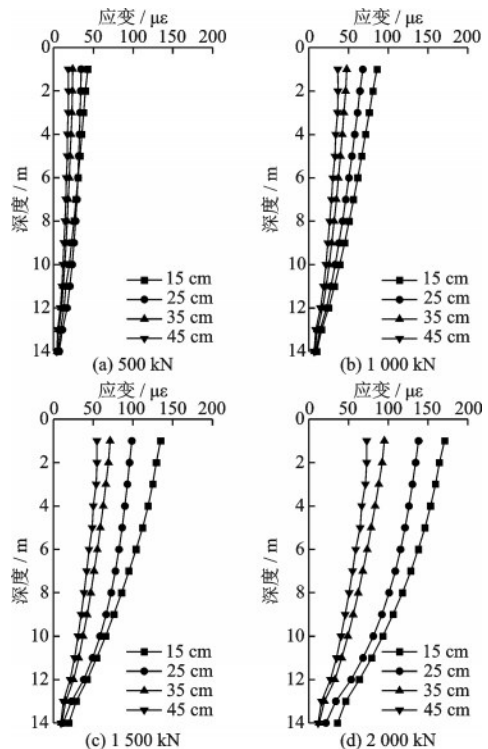


图10 不同腹板(翼缘)长度下桩身应变分布
Fig.10 Strain distribution along the pile shaft for varying web (flange) lengths

各级荷载作用下,不同腹板(翼缘)长度的雪花形钢板桩桩底的应变基本一样,只有2 000 kN荷载作用下腹板(翼缘)长度为15 cm的桩底应变较大,这是因为2 000 kN的荷载已经达到了该桩的承载能力。

3.4 桩长的影响

为探究桩长对桩身变形的影响,分别选取12、14、16及18 m的桩长进行数值模拟。图11为500、1 000、1 500、2 000 kN竖向荷载作用下不同桩长的桩身应变对比。

如图11所示,桩身应变都是在桩顶处最大,桩底最小,且不同桩长的桩在桩顶和桩底的应变基本一致。随着深度增加,桩身应变逐渐减小。相同荷载作用下,随着桩长增加,距离桩顶相同距离处的桩身应变不断增加,且增加幅度不断减小。随着荷载增加,桩身应变变化一致,都在不断增加,且不同桩长的雪花形钢板桩之间桩身应变差也在增大,应变分布曲线不断趋于平缓。各级荷载作用下,不同桩长的雪花形钢板桩桩底的应变基本一样,只有2 000 kN荷载作用下桩长为12 m的桩底应变较大,这是因为2 000 kN的荷载已经达到该桩的承载力。

3.5 钢板弹性模量的影响

钢板桩制作时采用的钢材不同,其桩身弹性模量也不同。为探究钢板弹性模量对桩身变形影响,分别选取弹性模量为126、166、206及246 GPa的不同钢板进行数值模拟。图12为500、1 000、1 500、2 000 kN竖向荷载作用下不同桩身弹性模量的桩身应变对比。

如图12所示,不同钢板弹性模量的雪花形钢板桩在不同竖向荷载作用下的桩身应变分布规律基本一致。桩身应变都是在桩顶处最大,随着深度增加,桩身应变逐渐减小,且减小速率逐渐增大。相同荷载作用下,随着桩身弹性模量增加,相同位置处的桩身应变不断减小,减小的速率也逐渐降低。随着荷载增加,桩身应变变化一致,都在不断增加,且不同桩身弹性模量的雪花形钢板桩之间桩身应变差也在增大,应变分布曲线不断趋于平缓。

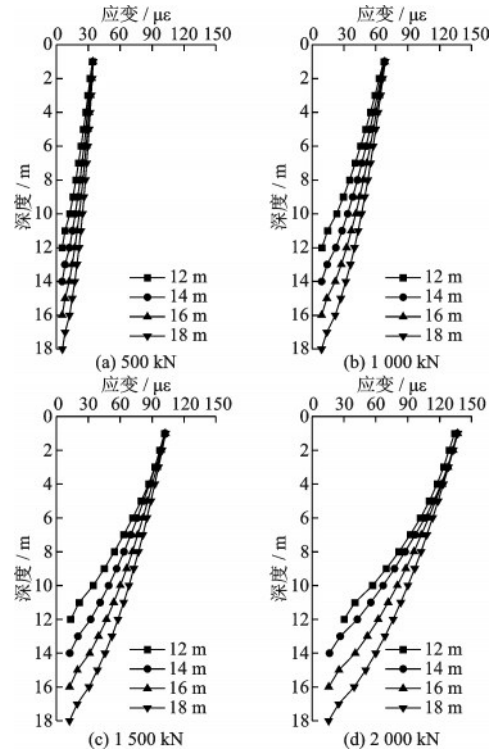


图11 不同桩长下桩身应变分布

Fig.11 Strain distribution along the pile shaft for varying pile lengths

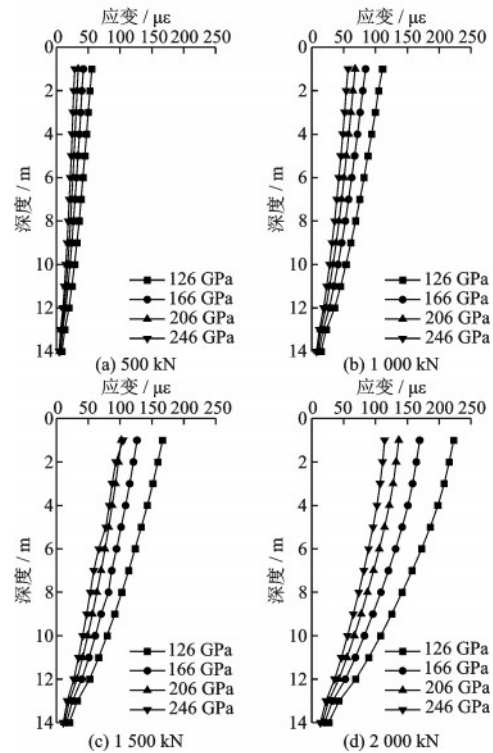


图12 不同钢板弹性模量下桩身应变分布

Fig.12 Strain distribution along the pile shaft for varying elastic modulus

4 结 论

介绍了雪花形钢板桩的结构和优点,开展了雪花形钢板桩数值模拟和室内模型试验研究,利用室内模型试验的结果验证了数值模型和参数选取的合理性,分析了雪花形钢板桩翼缘数量、腹板(翼缘)厚度、腹板(翼缘)长度、桩长和钢板弹性模量等因素对桩身变形的影响。得到以下结论:

(1)在竖向荷载作用下,雪花形钢板桩桩身应变在桩顶处最大,随着深度增加,桩身应变逐渐减小。

(2)增加翼缘数量可以减小桩体受力及改善桩体受力的均匀性,使整个截面同时高效分担桩顶受到的荷载,从而增强桩体的安全性。结合模拟结果,再综合考虑钢板桩制作的工艺及成本,雪花形钢板桩的三个腹板都存在翼缘最佳。

(3)腹板(翼缘)厚度、腹板(翼缘)长度、桩长和钢板弹性模量这四个因素对雪花形钢板桩桩身变形都存在一定影响。腹板(翼缘)厚度与桩身应变成反比,相同条件下腹板(翼缘)厚度越厚,桩身应变越小;腹板(翼缘)长度与桩身应变成反比,相同条件下腹板(翼缘)长度越长,桩身应变越小;同一深度处,桩长与桩身应变成正比,相同条件桩长越长,对应位置处桩身应变越大;钢板弹性模量与桩身应变成反比,相同条件下桩身弹性模量越大,桩身应变越小。

参考文献:

- [1] Kuhlmann U, Just A. Tragverhalten kombinierter Stahlspundwände unter Wasserdruck unter dem Einfluss von Lageimperfektionen[J]. Stahlbau, 2018, 87(4): 332-344.
- [2] Bharathi M, Dubey R N. Dynamic lateral response of under-reamed vertical and batter piles[J]. Construction and Building Materials, 2018, 158: 910-920.
- [3] 尹锋,周航,刘汉龙,等.车辆载重与动荷载对X形桩桩-网复合地基动力特性影响的试验研究[J].岩土力学, 2019, 40(4): 1324-1330, 1340.
Yin F, Zhou H, Liu H L, et al. Experimental study on the influence of vehicle load and dynamic load on dynamic characteristics of X-shaped pile net composite foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(4): 1324-1330, 1340. (in Chinese)
- [4] 韦实,邓成龙,梁荣柱,等.基于3D打印的锁口钢管桩围护结构变形特性试验研究[J].岩石力学与工程学报, 2020, 39(增2): 3676-3686.
Wei S, Deng C L, Liang R Z, et al. Model testing on deformation characteristics of the locking steel pipe pile retaining structure by using 3D printing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(Sup2): 3676-3686. (in Chinese)
- [5] 王新泉,任连伟,杨权威,等.Y形桩与圆形桩承载性能对比模型试验[J].中国公路学报, 2016, 29(5): 11-18.
Wang X Q, Ren L W, Yang Q W, et al. Comparative model test of bearing capacity of Y-shaped pile and circular pile[J]. Chinese Journal of Highway, 2016, 29(5): 11-18. (in Chinese)
- [6] 张敏霞,崔文杰,徐平,等.竖向荷载作用下挤扩支盘桩桩周土体位移场变化规律研究[J].岩石力学与工程学报, 2017, 36(增1): 3569-3577.
Zhang M X, Cui W J, Xu P, et al. Study on displacement field of soil around squeezed branch pile under vertical load[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(Sup1): 3569-3577. (in Chinese)
- [7] Cui W, Zhang Q Q, Zheng X. Discussion of "Comparative study of Y-shaped and circular floating piles in consolidating clay" [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2017, 54(6): 904-905.
- [8] 李立锋,王桂尧,张永杰,等.H形抗滑桩内力变形机理数值分析研究[J].公路与汽运, 2016, 175(4): 136-140.
Li L F, Wang G Y, Zhang Y J, et al. Numerical analysis of internal force and deformation mechanism of H-shaped anti slide pile [J]. Highway and Automobile Transportation, 2016, 175(4): 136-140. (in Chinese)
- [9] 高磊,宋涵韬,刘汉龙,等.雪花型钢板桩及其加工与施工方法:中国,ZL201810192602.X[P].2018-09-04.
Gao L, Song H T, Liu H L, et al. Snowflake steel sheet pile and its processing and construction method: China, ZL201810192602.X[P]. 2018-09-04. (in Chinese)
- [10] 吕亚茹,丁选明,刘汉龙,等.刚性荷载下现浇X形桩复合地基桩侧摩阻力数值分析[J].岩土工程学报, 2012, 34(11): 2134-2140.
Lyu Y R, Ding X M, Liu H L, et al. Numerical analysis of pile side friction of cast-in-place X-shaped pile composite foundation under rigid load[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(11): 2134-2140. (in Chinese)
- [11] 张德华,郭鹏,贺德新.DX嵌岩桩失效机制试验研究[J].土木工程学报, 2017, 50(增2): 58-65.
Zhang D H, Guo P, He D X. Experimental study on failure mechanism of DX rock socketed pile [J]. Chinese Journal of Civil Engineering, 2017, 50(Sup2): 58-65. (in Chinese)
- [12] 王新泉,陈永辉,陈龙,等.路堤荷载下Y形桩与常规桩

型对比研究[J].铁道工程学报,2011,28(11):46-51.
Wang X Q, Chen Y H, Chen L, et al. Comparative study of Y-shaped pile and conventional pile type under embankment load [J]. Journal of Railway Engineering, 2011, 28(11): 46-51. (in Chinese)

[13] 崔允亮,王海峰,王新,等.大直径钢管复合桩承载特性研究[J].地下空间与工程学报,2020,16(5):1467-1475.
Cui Y L, Wang H F, Wang X, et al. Study on bearing characteristics of large diameter steel pipe composite pile [J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(5): 1467-1475. (in Chinese)

[14] Chen L, Chang D D, Li G X. Finite element analysis of

bearing capacity of a single DX pile[J]. Engineering Mechanics, 2002, 19 (6): 67-72.

[15] 高磊,钮家军,许方领,等.X形混凝土桩桩身变形数值模拟研究[EB/OL].(2015-05-27)[2021-07-20].http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201505-381.

[16] 陈育民,徐鼎平.FLAC / FLAC3D 基础与工程实例[M].北京:中国水利水电出版社,2009:130-153.
Chen Y M, Xu D P. FLAC / FLAC3D foundation and engineering examples [M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2009: 130-153. (in Chinese)

(本文编辑:周小潭)



(上接第 507 页)

[7] Choun Y S, Park J. Evaluation of seismic shear capacity of prestressed concrete containment vessels with fiber reinforcement[J]. Nuclear Engineering & Technology, 2015, 47(6):756-765.

[8] Choun Y S, Park H K. Containment performance evaluation of prestressed concrete containment vessels with fiber reinforcement [J]. Nuclear Engineering and Technology, 2015, 47(7):884-894.

[9] 混凝土结构设计规范:GB 50010—2002[S].北京:中国建筑工业出版社,2002.

[10] 高丹盈.钢纤维混凝土拉伸应力应变关系的试验研究[J].水力发电,1991(11):54-58.
Gao D Y. Experimental study on the relationship between tensile stress and strain of steel fiber reinforced concrete[J]. Hydroelectric Power, 1991 (11): 54-58. (in Chinese)

[11] 焦楚杰,孙伟,秦鸿根,等.钢纤维高强混凝土单轴受压本构方程[J].东南大学学报:自然科学版,2004, 34(3):366-369.
Jiao C J, Sun W, Qin H G, et al. Constitutive equation

of SFRHSC under uniaxial compression[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2004, 34(3): 366-369. (in Chinese)

[12] 钟光淳,周颖,肖意.钢-聚乙烯醇混杂纤维混凝土单轴受力应力-应变曲线研究[J].工程力学,2020,37(增1):111-120.
Zhong G C, Zhou Y, Xiao Y. Stress-strain behavior of steel-polyvinyl alcohol hybrid fiber reinforced concrete under axial compression and tension[J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(Sup1): 111-120. (in Chinese)

[13] Yin C, Xu L, Zhang Y. Experimental study on hybrid fiber-reinforced concrete subjected to uniaxial compression[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2014, 26(2):211-218.

[14] 徐礼华,梅国栋,黄乐,等.钢-聚丙烯混杂纤维混凝土轴心受拉应力-应变关系研究[J].土木工程学报,2014,47(7):35-45.
Xu L H, Mei G D, Huang L, et al. Study on uniaxial tensile stress-strain relationship of steel-polypropylene hybrid fiber reinforced concrete[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(7): 35-45. (in Chinese)