

基于 ABAQUS 的钢管混凝土斜桩工作性状分析

杨美良¹,李烈敏¹,孙坤江²,韩锐¹,钟扬³

(1.长沙理工大学 土木工程学院,湖南 长沙 410114;2.浙江交工国际工程有限公司,浙江 杭州 310051;

3.湖南机场建设指挥部,湖南 长沙 410114)

摘要:为探究竖向荷载作用下钢管混凝土斜桩桩身响应特征,该文以马来西亚 Saribas 桥的钢管混凝土斜桩为研究对象,基于数值模拟方法进行分析,研究了该类斜桩在竖向荷载作用下钢管内外壁摩阻力、截面处桩周的摩阻力以及钢管与混凝土芯的弯矩分配比。结果表明:钢管外壁 0~15 m 桩段被动侧摩阻力大于主动侧摩阻力,其他桩段则相反;钢管内壁的摩阻力较复杂,且存在摩阻力为零的桩段;同时,不同截面处钢管内外壁的摩阻力沿桩周呈不均匀分布;在弯矩分配上,桩顶处钢管承担的弯矩较大,而在距桩顶 37 m 处及混凝土芯桩端,混凝土芯承担更多弯矩,其他桩段钢管和混凝土芯的弯矩承担比接近 50%。

关键字:桥梁基础;钢管混凝土斜桩;桩土效应;ABAQUS;摩阻力

中图分类号:U443.15

文献标志码:A

Working Properties of Steel Tube Batter Piles with Concrete Infill Based on ABAQUS

YANG Meiliang¹, LI Liemin¹, SUN Kunjiang², HAN Rui¹, ZHONG Yang³

(1.School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China; 2. Zhejiang Jiaogong International Engineering Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310051, China; 3. Hunan Airport Construction Headquarters, Changsha, Hunan 410114, China)

Abstract: In order to explore the response characteristics of steel tube batter piles with concrete infill under vertical load, the steel tube batter pile with concrete infill used in Saribas Bridge in Malaysia was taken as the research object. Based on the numerical simulation method, the frictional resistance of the inner and outer walls of the steel tube, the frictional resistance around the pile at the section, and the bending moment bearing ratio between the steel tube and the concrete core of this type of batter pile under vertical load were studied. The results show that the passive-side frictional resistance of the 0 - 15 m pile section is greater than the active-side frictional resistance on the outer wall of the steel tube, but the active-side frictional resistance of other pile sections is greater than the passive-side frictional resistance. The frictional resistance of the inner wall of the steel tube is complicated, and there is a pile section with zero frictional resistance. The frictional resistance of the inner and outer wall of the steel tube at different sections shows a non-uniform distribution around the pile; the steel tube at the top of the pile bears a larger bending moment, while at 37 m from the top of the pile and at the end of the concrete core, the concrete core bears a larger bending moment, and the bending moment bearing ratio of steel tube and concrete core in other pile sections is close to 50%.

Keywords: bridge foundation; steel tube batter pile with concrete infill; pile-soil effect; ABAQUS; frictional resistance

0 引言

近年来随着经济的快速发展,基础工程建设已

从大陆发展到海上,跨海大桥、风电场、港口码头以及石油钻井平台等一系列海上建筑正在建设中。钢管桩具有能承受较强的水流和船舶的冲击力、承载

收稿日期:2024-05-13(修改稿)

基金项目:湖南省教育厅重点科研项目(编号:21A0213);浙江省交通运输厅科技项目(编号:JGGJ-JSFWHT-2021-00017)

作者简介:杨美良,女,博士,教授.E-mail:1065506644@qq.com

性能高、水平阻力大、桩长易调节以及与上部结构易结合等优点^[1-2],故在海上工程的桩基础中应用越来越广泛。由于下部结构需要承受波浪荷载、风荷载以及船舶的撞击力,在基础的设计中通过将桩基础设置一定倾角来抵抗水平荷载,这样将桩身所受的水平荷载部分转化为沿桩轴方向的轴向荷载,相对于直桩来说具有良好的水平受荷能力^[3-5]。

近年来对直桩的承载特性研究相对成熟,但荷载作用下,斜桩的工作性能不同于直桩,国内外学者对斜桩的力学性能和承载特性少有研究^[6-7],对钢管斜桩的研究更少。徐江等^[8]对东海大桥风电场的两根钢管直桩与两根钢管斜桩进行了现场试验研究和数值分析,发现钢管斜桩附近土体的沉降是非均匀不对称的;轴向荷载作用下斜桩桩前土体产生的沉降大于桩后土体的沉降,且沉降的范围也大于桩后的范围;Li等^[9]对海上风电场的两根钢管直桩与两根钢管斜桩进行了O-cell试验,应用该方法可以成功地确定轴压承载力和拉拔承载力。

而工程中逐渐采用将钢管与混凝土相结合的钢管混凝土复合桩基础。目前钢管混凝土复合桩理论的研究明显滞后于工程实际的使用,魏纲等^[10]基于桩-土位移协调关系,推导出适用于计算钢管混凝土复合桩的承载力公式,且通过工程实测值验证了所提出公式的可靠性;孟凡超等^[11]以港珠澳大桥的钢

管混凝土复合桩为研究对象开展了模型试验,结合模型试验提出了钢管复合桩抗弯刚度计算公式;卓杨等^[12]通过原型试验研究了钢管混凝土管桩的抗弯承载力。以上学者通过理论方法对钢管混凝土复合桩开展了研究工作。Dong等^[13]与冯居忠等^[14]通过离心模型试验,分析了复合钢管混凝土桩和普通钢筋混凝土桩之间的承载差异,并根据试验现象得出钢管混凝土复合桩承载力高于普通钢筋混凝土桩。以上学者通过试验与理论的方法开展了钢管混凝土复合桩的研究工作。而钢管混凝土斜桩还未有学者开展过研究工作,因此本文采用数值模拟的方法,对钢管混凝土斜桩钢管内外壁的摩阻力、截面处桩周的摩阻力以及钢管与混凝土芯的弯矩分配比进行研究。随着越来越多的海洋工程设施不断出现,钢管混凝土斜桩的运用越来越多,为此开展钢管混凝土斜桩力学行为的研究势在必行。

1 工程概况

本文以马来西亚 Saribas 桥为依托工程,该主桥为单箱单室变截面预应力混凝土刚构-连续组合梁桥,主桥全长 1 230 m,跨径组合为(90+150+175+2×200+175+150+90) m,其中 7[#]墩、8[#]墩、9[#]墩与主梁固结,5[#]墩、6[#]墩、10[#]墩、11[#]墩为连续墩,桥型布置如图 1 所示。

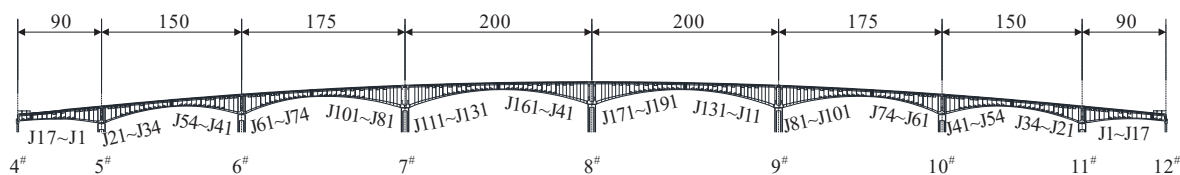


图1 萨里巴斯大桥桥型布置图(单位:m)

Figure 1 Layout of bridge type of Saribas Bridge(unit:m)

主桥基础采用钢管混凝土桩,每个基础下设置 4 根直桩和 28 根直径 1.54 m、斜率为 1:8(倾角约 7°)的钢管混凝土斜桩,28 根钢管混凝土斜桩在承台底面围绕 4 根直桩按照六边形环绕分布。钢管管材为符合 BS4360 的 50B 钢材,壁厚 0.02 m。

本工程为海上工程,桩基础承受波浪、水流荷载、风荷载以及上部结构传递下来的自重荷载等,承载力要求高。为确保施工过程中结构的安全性,需预先对桩基础采取试桩试验,以此来评估原状土荷载-沉降曲线特性以及桩的安全性。在每个承台下

的桩基础中选取一根直桩作为试桩,共选择 5 根桩做试桩试验。根据本桥的地勘报告获取桩基础位置处的土层概况,如图 2(a)所示,试桩试验布置如图 2(b)所示。

2 直桩试验

钢管桩竖向承载力测试采用静载试验,静载试验系统主要由反力系统、液压加载系统和位移量测系统组成。位移量测系统主要由基准桩、桩顶的 LVDT 位移传感器、参考梁上的标尺和桩上直尺等组成。测

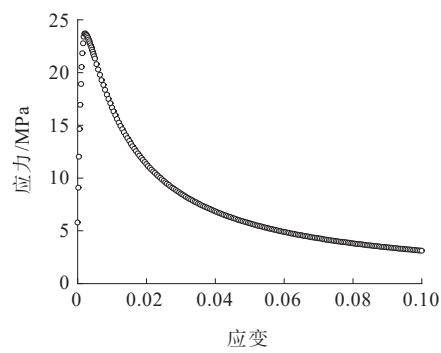


图3 混凝土应力-应变关系

Figure 3 Stress-strain relationship of concrete

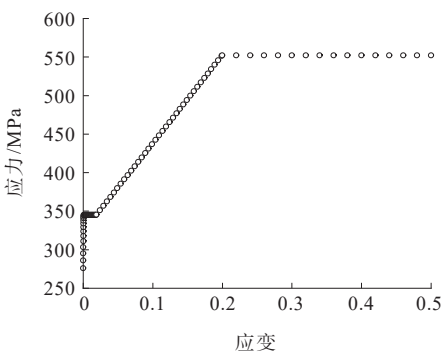


图4 50B钢管应力-应变关系

Figure 4 Stress-strain relationship of 50B steel tube

表2 钢管混凝土桩模型物理参数

Table 2 Physical parameters of steel tube pile model with concrete infill			
模型名称	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν
核心混凝土(C30)	2 500	22.88	0.2
钢管(50B)	7 850	210.00	0.3

3.2.2 土体

土体采用摩尔-库仑(Mohr-Coulomb)弹塑性模型。桩周土模量对受荷桩的桩身变形影响较大,但是地质勘探资料中未给出土体弹性模量与变形模量的值,但往往会提供压缩模量^[17]。杨仁杰等^[18]根据上海地区附近60多根桩的实测数据,得出可取压缩模量的2.5~3.5倍作为弹性模量的取值。通过将试算结果与实测结果对比后再对参数进行调整,确定合适的土体参数取值,结合本桥的地勘情况,土体的具体计算参数如表3所示。

3.3 桩土接触及边界条件

ABAQUS中设置接触对来模拟桩-土间的相互作用以及钢管和混凝土之间的黏结作用,选择面面主从接触(surface to surface),以钢管外表面和内表

面为主表面,以土体和管内混凝土土芯为从表面。接触面的法向采用“硬接触”,切向采用库仑摩擦中的“罚”函数定义,桩-土间的摩擦系数取 $\mu = \tan(0.67\varphi)^{[19]}$,其中 φ 为桩周土的内摩擦角,钢管与混凝土之间的摩擦系数取为0.3^[20]。

表3 土体模型物理力学参数

Table 3 Physical and mechanical parameters of soil model

土层	压缩模量/MPa	泊松比 ν	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	黏聚力 c/kPa
极软砂质粉土	8.34	0.40	987	27.1	11.0
软至硬淤泥	3.02	0.35	1 053	29.7	9.8
硬至硬砂质粉土	7.53	0.30	1 940	20.2	24.3
硬砂质粉土	9.90	0.30	1 950	19.0	23.0
密实黏土砂	11.43	0.30	1 560	36.2	1.8

在土体的底部设置固定约束,土体的侧面限制水平方向的位移^[21]。为保证计算精度的同时缩短计算时间,土体模型采用单精度布置,对近桩的土体设置较密的网格,远离桩的土体区域设置相对稀疏的网格,计算模型及网格划分如图5所示。土体、钢管和管内混凝土土芯都采用实体缩减单元(C3D8R)模拟;钢管采用三维实体单元(C3D8R)定义单元类型,避免了S4R壳单元不能建立双面接触的问题。

3.4 有限元模拟工况

为研究竖向荷载作用下的钢管混凝土斜桩的桩身响应,采用ABAQUS分别建立了管内有混凝土土芯的钢管混凝土直桩、钢管混凝土斜桩和管内无混凝土土芯的钢管直桩3种模型进行对比分析,计算模型如图5所示。

在施加循环荷载前,首先对建立的数值分析模型进行初始地应力平衡计算^[22]。ABAQUS中有多种地应力平衡方法可供选择,本文采用ODB导入加生死单元的方法对土体模型进行地应力平衡。重力荷载作用下土体地应力平衡计算结果如图6所示,结果表明:土体的竖向位移 U_3 小于 10^{-4} m ,说明采用此方法能够得到一个较好的近似为零的初始应力场,可进行后续的计算分析。

数值分析模型中,桩顶的竖向荷载采用分级加载卸载,其加载数值与试桩试验数据相同(表1)。荷载取值为:加载到100%即总荷载为11 723 kN,加载到200%即总荷载为23 445 kN。荷载采用分级加卸

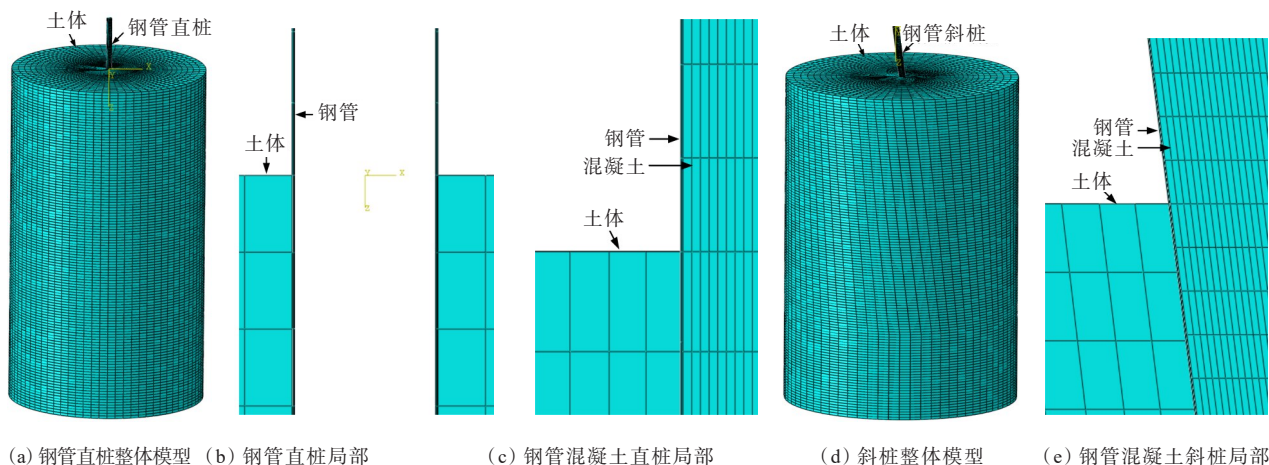


图 5 数值模型计算图

Figure 5 Numerical model calculation

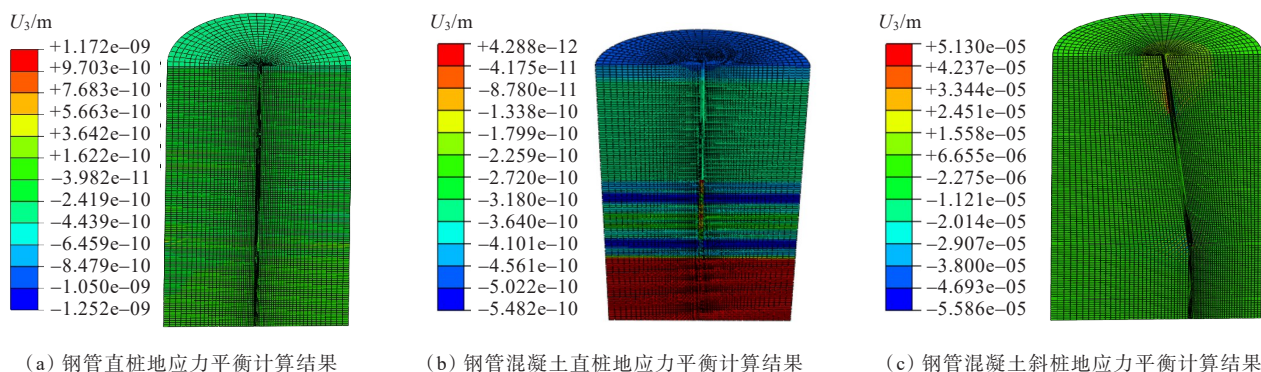


图 6 初始地应力平衡结果

Figure 6 Initial in-situ stress balance result

载,目的是防止在一个增量步中因变形过大导致计算无法收敛并使桩体与土体之间的接触能够平稳过渡。

4 数值模拟结果分析

4.1 数值模拟验证

数值模拟方法广泛应用于桩-土系统桩身响应分析,计算结果能否真实反映桩-土系统实际的响应情况,取决于材料本构关系的选取、计算参数的取值和模型建立的准确性。为保证本文的数值模型能用于分析钢管混凝土斜桩基础效应,对数值模拟进行可靠性验证,选取直桩试桩试验的荷载-位移(Q-S)曲线与直桩数值分析计算的荷载-位移(Q-S)曲线进行对比验证,结果如图7所示。

从图7可以看出:数值分析结果Q-S与试桩实测结果Q-S曲线较吻合,说明所建立的数值分析模型能

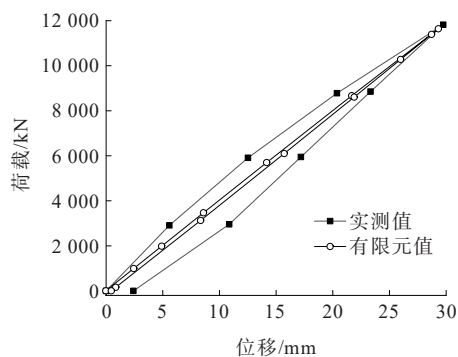
够模拟原状土的工作性状,为后续分析桩侧摩阻力以及弯矩分配比的正确性提供了可靠的依据。

4.2 钢管摩阻力分布

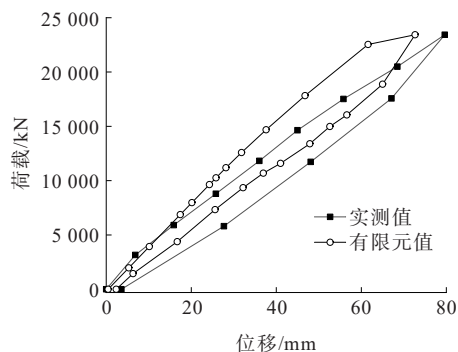
4.2.1 钢管外壁摩阻力沿桩身分布

为表达清楚,取沿斜桩斜上方为主动侧,斜桩的斜下方为被动侧^[23][图2(a)];摩阻力方向选取沿桩身纵轴向从桩端指向桩顶的方向为正,反之为负。为分析斜桩与直桩的钢管外壁摩阻力分布差异,选取钢管直桩、钢管混凝土直桩和钢管混凝土斜桩3种模型中钢管外壁的摩阻力进行分析,图8为桩顶竖向荷载为11 723 kN时钢管外壁摩阻力沿桩身变化关系曲线。

由图8可知:3种模型各桩侧摩阻力存在差异,摩阻力峰值从小到大依次为:钢管混凝土斜桩被动侧、钢管直桩、钢管混凝土直桩、钢管混凝土斜桩主动侧。由钢管直桩和钢管混凝土直桩的摩阻力曲线可



(a) 第1循环分级加载卸载



(b) 第2循环分级加载卸载

图7 直桩数值模拟和试桩试验结果对比

Figure 7 Comparison of numerical simulation of vertical pile and results of test pile

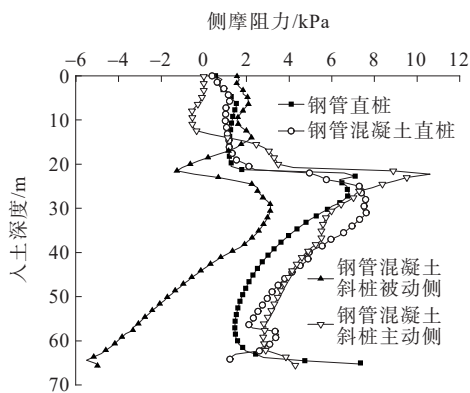


图8 钢管外壁摩阻力沿桩身分布曲线

Figure 8 Distribution curve of frictional resistance of outer wall of steel tube along pile

知:钢管混凝土直桩的桩侧摩阻力大于钢管直桩,经分析认为钢管直桩中桩顶荷载部分传递到桩端,由桩端反力承受,而钢管混凝土直桩中荷载全部由桩侧摩阻力来承受。钢管直桩的桩端位置处摩阻力急剧增大,其原因是桩端刺入土体,导致桩端与土体之间的相对位移急剧增大,进而产生更大的摩阻力。

钢管混凝土斜桩中,桩身主动侧在泥面附近(0~5 m)摩阻力为零,说明桩身挠曲变形导致桩身主动侧与土体产生了分离;对桩身被动侧土体挤压,从而在0~15 m桩段出现被动侧的摩阻力大于主动侧的;15 m以下桩段,由于桩身发生反弯变形,出现主动侧摩阻力大于被动侧。

4.2.2 钢管内壁摩阻力沿桩身分布

为分析钢管混凝土斜桩中钢管和混凝土的协同受力作用,进一步提取钢管混凝土斜桩中钢管内壁的主动侧和被动侧的摩阻力,结果如图9所示。

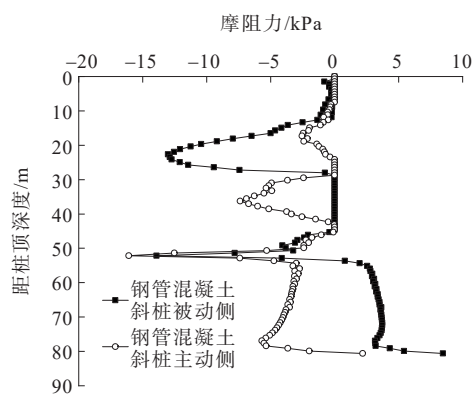


图9 钢管混凝土斜桩中钢管内壁摩阻力分布

Figure 9 Distribution of frictional resistance of inner wall of steel tube in steel tube batter pile with concrete infill

由图9可知:钢管内壁的主动侧和被动侧摩阻力均呈现非线性变化。在0~27 m桩段,钢管内壁的被动侧摩阻力大于主动侧摩阻力,且均为负摩阻力,这是因为桩顶的竖向荷载使桩身产生弯曲变形,变形后桩身截面同桩身轴线垂直,而钢管的位移大于混凝土,从而钢管产生沿与混凝土芯接触面斜向上的相对位移且钢管内壁被动侧的相对位移大于主动侧;在50~54 m的桩段,钢管内摩阻力存在突变,这是由于51~80 m桩段钢管内为土塞,桩顶竖向荷载作用下管内混凝土芯对其桩端的土塞产生压缩,从而混凝土相对于钢管产生沿纵轴向下的相对滑移,导致该桩段内摩阻力急剧变化;同样,钢管的桩端处内摩阻力也急剧增大,这是因为在桩端刺入土体,使桩端处的土体挤入桩内;在25~45 m桩段,桩身发生反弯变形,钢管内壁的被动侧出现摩阻力为0的现象。

4.2.3 钢管内、外壁摩阻力沿桩周分布

竖向荷载作用下斜桩会产生弯曲变形,这使得

部分桩段与桩前土体相互挤压、与桩后土体有分离的趋势;桩前土体的径向压力大于桩后土体的径向压力,导致部分桩段桩前与桩后摩阻力大小存在差异,因此需进一步对钢管混凝土斜桩的桩周摩阻力分布(图10)进行研究。分析了钢管混凝土斜桩中距泥面 $Z/L=0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ 的截面上,不同桩周位置处钢管外壁与内壁的摩阻力分布,结果如图11~12所示,其中 L 为桩的入土桩长。

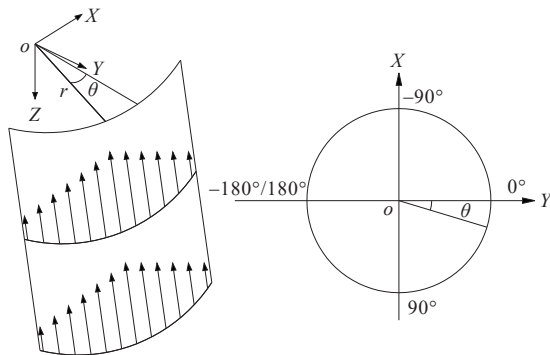


图10 桩周摩阻力三维示意图

Figure 10 Three-dimensional diagram of frictional resistance around pile

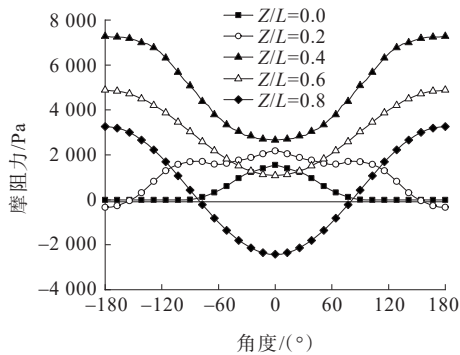


图11 不同桩身截面钢管外壁摩阻力沿桩周分布曲线

Figure 11 Distribution curve of frictional resistance of outer wall of steel tube with different pile sections around pile

由图11、12可知:竖向荷载作用下,沿桩身的不同截面处钢管外壁和内壁的摩阻力沿桩周呈现出非均匀分布的规律,与Prasad等^[24]和Ashour等^[25]的研究结果基本一致。从图11中 $Z/L=0$ 的曲线可以看出:在泥面处桩身截面钢管的外壁 $-180^\circ \sim -90^\circ$ 、 $90^\circ \sim 180^\circ$ 位置侧摩阻力为0,这是由于泥面的部分桩段与桩后土体出现分离现象。由图12可知:桩身上部的桩段钢管内壁摩阻力沿桩周分布变化较大,侧摩阻力随角度的变化增长率不断变化;从 $Z/L=0.4$

位置的截面开始,侧摩阻力随角度变化沿桩周呈现为余弦曲线的分布规律。

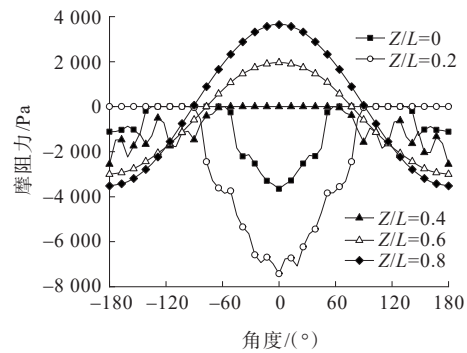


图12 不同桩身截面钢管内壁摩阻力沿桩周分布曲线

Figure 12 Distribution curve of frictional resistance of inner wall of steel tube with different pile sections around pile

4.3 钢管和混凝土芯弯矩分配比

为研究钢管混凝土斜桩中具有混凝土芯的桩段钢管和混凝土的弯矩分配比,分析了桩顶竖向荷载11 723 kN作用下桩身截面弯矩分配比,结果如图13所示。

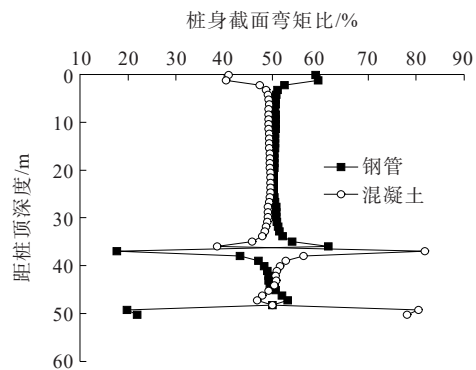


图13 桩顶荷载为11 723 kN桩身截面弯矩比

Figure 13 Bending moment ratio of pile section with load at pile top of 11 723 kN

由图13可知:在桩顶处,钢管承担的弯矩较大,占桩顶截面弯矩的59.1%;沿桩轴纵向向下,钢管的弯矩承担比急剧减小,到距桩顶深度4.27 m的桩段开始钢管与混凝土的弯矩承担比几乎相同,两者同步受弯;沿桩身向下到达35.93 m桩段位置,钢管和混凝土的应力发生重分布,在距桩顶37 m处,混凝土承担的弯矩比达到81.79%,此时主要由混凝土芯承受桩身的弯矩;随后钢管和混凝土各自承担弯矩比接近50%;到桩端位置,主要由混凝土芯承受桩身的弯矩,占桩身截面总弯矩的78.1%。

5 结论

(1) 桩顶竖向分级荷载作用下,数值分析结果与试桩试验结果较吻合,表明本文建立的数值分析模型可靠。

(2) 钢管混凝土斜桩中,钢管外壁主动侧与被动侧的侧摩阻力大小存在差异,钢管外壁0~15 m桩段被动侧摩阻力大于主动侧摩阻力,其他桩段主动侧摩阻力大于被动侧摩阻力;而钢管内壁摩阻力呈现出非线性变化,一定深度处,桩身反弯变形,钢管内壁被动侧存在摩阻力为0的桩段。

(3) 斜桩的桩周摩阻力分布相对于直桩存在差异,竖向荷载作用下,钢管混凝土斜桩钢管内外壁不同截面处摩阻力沿桩周呈现出非均匀分布,泥面处桩身截面钢管的外壁 $-180^{\circ}\sim-90^{\circ}$ 、 $90^{\circ}\sim180^{\circ}$ 位置侧摩阻力为0。

(4) 钢管和混凝土芯在桩顶、桩端以及应力重分布的桩段,主要由钢管或混凝土芯承受桩身的弯矩,其他桩段钢管和混凝土芯协同工作、同步受弯。

“钢管+混凝土芯”桩以组合桩的形式表现出良好的共同工作性能,使其在海洋桩基础工程中具有较大的发展前景。研究成果可以为钢管混凝土斜桩基础的设计和结构优化提供可靠的技术支持及实践依据。

参考文献:

References:

- [1] 俞振全. 钢管桩的设计与施工[M]. 北京:地震出版社, 1993.
YU Zhenquan. Design and construction of steel pipe piles [M]. Beijing: Seismological Publishing House. 1993.
- [2] 彭鑫. 薄覆盖层河床钢栈桥钢管桩的锚固方法探索与实践[J]. 中外公路, 2020, 40(3): 154-156.
Peng Xin. Research and practice of anchoring method for steel pipe pile of steel trestle in thin overburden bed[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(3): 154-156.
- [3] GIANNAKOU A, GEROLYMOS N, GAZETAS G, et al. Seismic behavior of batter piles: Elastic response[J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2010, 136(9): 1187-1199.
- [4] 周德泉, 王创业, 周毅, 等. 被动倾斜桩应用研究与展望[J]. 中外公路, 2023, 43(2): 1-10.

- ZHOU Dequan, WANG Chuangye, ZHOU Yi, et al. Application research and prospect of passive battered pile [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(2): 1-10.
- [5] 周德泉, 谢旭, 黄鹏, 等. 路堤坡脚被动正斜桩工程响应试验研究[J]. 公路交通科技, 2023, 40(7): 60-67.
ZHOU Dequan, XIE Xu, HUANG Peng, et al. Experimental study on engineering response of passive positive batter pile at embankment slope toe[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2023, 40(7): 60-67.
- [6] 曹卫平, 赵呈, 李元, 等. 上拔荷载对斜桩水平承载性状影响的试验研究[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(8): 82-88.
CAO Weiping, ZHAO Cheng, LI Yuan, et al. Experimental study on influence of uplift load on horizontal bearing behavior of batter piles[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2022, 37(8): 82-88.
- [7] 成涛, 付甦, 邓松涛. 复杂水文地质条件下水上倾斜桩基施工平台结构设计[J]. 中外公路, 2023, 43(4): 176-182.
CHENG Tao, FU Su, DENG Songtao. Structure design of platform for construction of inclined pile foundation on the water under complex hydrogeology conditions[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(4): 176-182.
- [8] 徐江, 龚维明, 张琦, 等. 大口径钢管斜桩竖向承载特性数值模拟与现场试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(8): 2434-2440, 2447.
XU Jiang, GONG Weiming, ZHANG Qi, et al. Numerical simulation and field test study on vertical bearing behaviors of large diameter steel of inclined piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(8): 2434-2440, 2447.
- [9] LI X J, DAI G L, ZHU M X, et al. Application of static loading tests to steel pipe piles with large diameters in Chinese off shore wind farms[J]. Ocean engineering, 2019, 186: 106041.
- [10] 魏纲, 王新, 崔允亮, 等. 超长直径变截面钢管复合桩竖向承载力算法[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(3): 810-817.
WEI Gang, WANG Xin, CUI Yunliang, et al. Calculation method of vertical bearing capacity of super-long large-diameter and step tapered composite steel pile[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2022, 18(03): 810-817.
- [11] 孟凡超, 吴伟胜, 刘明虎, 等. 港珠澳大桥桥梁钢管复合桩设计方法研究[J]. 工程力学, 2015, 32(1): 88-95.
MENG Fanchao, WU Weisheng, LIU Minghu, et al. Study of composite steel pile in the design of Hongkong-Zhuhai-

- Macao Bridge[J]. *Engineering Mechanics*, 2015, 32(1): 88-95.
- [12] 卓杨, 曹进捷, 邱松. 大直径离心钢管混凝土管桩抗弯承载力研究[J]. *岩土工程学报*, 2011, 33(增刊2): 135-138.
ZHUO Yang, CAO Jinjie, QIU Song. Flexural capacity of large-diameter thin-wall steel and spun concrete composite piles[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(sup 2): 135-138.
- [13] DONG Y X, FENG Z J, HU H B, et al. The horizontal bearing capacity of composite concrete-filled steel tube piles[J]. *Advances in civil engineering*, 2020, 2020: 3241602.
- [14] 冯忠居, 王富春, 张其浪, 等. 钢管混凝土复合桩竖向承载特性离心模型试验[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2018, 38(2): 42-49.
FENG Zhongju, WANG Fuchun, ZHANG Qilang, et al. Centrifuge model test of vertical bearing characteristics of steel pipe concrete composite pile[J]. *Journal of Chang'an University(Natural Science Edition)*, 2018, 38(2): 42-49.
- [15] 郭玉树, 亚克慕斯·马丁, 阿布达雷赫曼·哈里. 用循环三轴试验分析海上风力发电机单桩基础侧向位移[J]. *岩土工程学报*, 2009, 31(11): 1729-1734.
GUO Yushu, MARTIN A, KHALID A R. Estimation of lateral deformation of monopile foundations by use of cyclic triaxial tests[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, 31(11): 1729-1734.
- [16] 聂建国, 王宇航. ABAQUS中混凝土本构模型用于模拟结构静力行为的比较研究[J]. *工程力学*, 2013, 30(4): 59-67, 82.
NIE Jianguo, WANG Yuhang. Comparison study of constitutive model of concrete in ABAQUS for static analysis of structures[J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(4): 59-67.
- [17] 李小娟. 水平荷载下海上风电大直径钢管桩-土相互作用研究[D]. 南京: 东南大学, 2020.
LI Xiaojuan. Research on the pile-soil interaction of offshore wind farm foundation under lateral load[D]. Nanjing: Southeast University, 2020.
- [18] 杨仁杰, 杨敏, 周国然, 等. 上海地区超长 609 径钢管桩的试验研究[J]. *结构工程师*, 1987, 3(2): 35-44.
YANG Renjie, YANG Min, ZHOU Guoran, et al. Experimental study on super long 609 diameter steel pipe piles in shanghai[J]. *Structural Engineers*, 1987(2): 36-45.
- [19] 赵爽, 王奎华, 吴君涛. 水平循环荷载下砂土中斜单桩累积变形特性[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2022, 56(7): 1310-1319.
ZHAO Shuang, WANG Kuihua, WU Juntao. Accumulated response of single batter pile under lateral cyclic loading in sand[J]. *Journal of Zhejiang University(Engineering Science)*, 2022, 56(7): 1-10.
- [20] 赵昕. 离心钢管混凝土抗压性能研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
ZHAO Xin. Research on compression performance of centrifugal concrete filled steel tube[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017.
- [21] 马倩雯. 大直径钢管桩水平承载能力研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.
MA Qianwen. Research on horizontal load-bearing capacity of large diameter steel pipe piles[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [22] 代汝林, 李忠芳, 王姣. 基于 ABAQUS 的初始地应力平衡方法研究[J]. *重庆工商大学学报(自然科学版)*, 2012, 29(9): 76-81.
DAI Rulin, LI Zhongfang, WANG Jiao. Research on initial geo-stress balance method based on ABAQUS[J]. *Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition)*, 2012, 29(9): 76-81.
- [23] 郑刚, 王丽. 成层土中倾斜荷载作用下桩承载力有限元分析[J]. *岩土力学*, 2009, 30(3): 680-687.
ZHENG Gang, WANG Li. Finite element analysis of bearing capacity of pile under inclined load in layered soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(3): 680-687.
- [24] PRASAD Y V S N, CHARIT R. Lateral capacity of model rigid piles in cohesionless soils[J]. *Soils and foundations*, 1999, 39(2): 21-29.
- [25] ASHOUR M, HELAL A. Contribution of vertical skin friction to the lateral resistance of large-diameter shafts[J]. *Journal of bridge engineering*, 2014, 19(2): 289-302.