

海上风电嵌岩桩水平承载力特性数值模拟研究

张力, 黄钺, 王洪庆, 赵学亮, 张景斐

引用本文:

张力, 黄钺, 王洪庆, 等. 海上风电嵌岩桩水平承载力特性数值模拟研究[J]. 南方能源建设, 2021, 8(3): 34–43.

ZHANG Li, HUANG Yue, WANG Hongqing, et al. Numerical Simulation Research on the Horizontal Bearing Capacity of Rock-Socketed Piles for Offshore Wind Turbines[J]. *Southern Energy Construction*, 2021, 8(3): 34–43.

相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

两段变直径桩的解析分析及工程应用

Analytical Analysis and Practice of Two-segment Variable Diameter Pile

南方能源建设. 2016, 3(4): 88–91,101 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2016.04.018>

海上风电钢管桩水平承载力计算方法研究

Calculation Method Study for the Horizontal Bearing Capacity of Offshore Wind Turbine Steel-Pile

南方能源建设. 2018, 5(3): 77–82 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.03.012>

冲刷作用下砂土地层中桩的侧向力学性质分析

Analysis of Laterally Loaded Piles in Sand Considering Scour Hole Dimensions

南方能源建设. 2018, 5(2): 24–36 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.02.004>

海上风电嵌岩区风机基础比选原则及依据

Principles and Basis of Wind Turbine Foundation Selection in Rock-socketed Area of Offshore Wind Power Engineering

南方能源建设. 2018, 5(4): 124–129 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.04.019>

海上风电超长钢管桩试桩关键技术浅析

Analysis on Key Technology of Pile Test of Super Long Steel Pipe Pile in Offshore Wind Farm

南方能源建设. 2018, 5(2): 86–92 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.02.012>

海上风电嵌岩桩水平承载力特性数值模拟研究

张力¹, 黄钺², 王洪庆¹, 赵学亮^{2,3,✉}, 张景斐²

(1. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663; 2. 东南大学土木工程学院, 南京 211189;
3. 东南大学混凝土及预应力混凝土结构教育重点实验室, 南京 211189)

摘要: [目的] 主要对海上风电嵌岩桩的桩基尺寸与竖向荷载等因素对其水平承载特性的影响进行研究。[方法] 文章采用有限差分的数值方法, 基于一处现场试验建立数值模型并进行参数分析。[结果] 结果表明: 嵌岩桩基存在一个临界嵌岩长度(长径比), 桩基尺寸的改变会影响桩-岩的相对刚度, 进而使临界嵌岩长度随之改变, 随着桩径的减小, 嵌岩桩临界嵌岩长径比逐渐增加; 在桩的承载能力范围内, 在竖向荷载与水平荷载共同作用下, 桩基的水平位移和桩身弯矩有较大幅度的减小, 如果认为竖向荷载引起的侧摩阻力在桩的两侧大小与方向相同, 或将竖向侧摩阻力简化为作用在桩的轴线则会忽略这一效应的影响, 会对计算结果造成误差。[结论] 论文结果对于临界嵌岩长度以及竖向荷载影响的分析将有助于水平承载嵌岩桩的合理设计和深入研究。

关键词: 嵌岩桩; 水平承载力; 数值模拟

中图分类号: TK89; TU473.1

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2021)03-0034-10

开放科学(资源服务)二维码:



Numerical Simulation Research on the Horizontal Bearing Capacity of Rock-Socketed Piles for Offshore Wind Turbines

ZHANG Li¹, HUANG Yue², WANG Hongqing¹, ZHAO Xueliang^{2,3,✉}, ZHANG Jingfei²

(1. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China;
2. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China;
3. Key Laboratory of Concrete and Prestressed Concrete Structure of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: [Introduction] The aim of this paper is to analyze the influence of the size and the vertical load of the pile foundation on the horizontal bearing capacity of rock-socketed piles. [Method] Based on a field test of the rock-socketed concrete pile under horizontal load, a 3-D finite difference numerical model was established and parametric analyses were performed. [Result] The results show that there is a critical rock-socketed length (ratio of length and diameter) for rock-socketed piles. Changes of the size of the pile will influence the relative stiffness of the pile and the rock, which will affect the critical rock-socketed length. With the decrease of the pile diameter, the critical socket length will increase. Within the scope of the bearing capacity of the pile and under the condition of combined vertical and horizontal load, the horizontal displacement and bending moment of the pile will have a pretty large decrease. This influence will be neglected if the vertical friction is assumed to be the same on the both sides of the pile or simplified to be at the center of the pile, which will cause error to the calculation results. [Conclusion] This study is supposed to provide contribution to the reasonable design and further research of the horizontal load of rock-socketed piles.

Key words: rock-socketed piles; horizontal bearing capacity; numerical simulation

2095-8676 © 2021 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

收稿日期: 2021-06-07 修回日期: 2021-08-17
基金项目: 广东省促进经济发展专项基金“基于大数据的海上风电场支撑结构强度与疲劳实时评估研究”(粤自然资源合[2019]019)

随着工程技术尤其是海上风电、海洋平台设计施工技术的发展以及工程建设规模与范围的扩大, 水平承载嵌岩桩的应用变得越来越广泛, 但由于岩

石地基与土体在刚度强度等材料特性上的差异, 直接套用传统桩基的设计方法容易产生较大误差, 而目前对嵌岩桩竖向承载特性的研究相对成熟, 针对嵌岩桩水平承载特性的研究则仍有许多不足之处。为了研究水平承载嵌岩桩的桩岩相互作用机理与承载特性, 可以采用现场原位试验、实验室模型试验和数值模拟等方法。现场原位试验的条件与结果更接近实际工程情况, 通过现场试验既能检验现有规范和文献中设计方法或数值模型的准确性^[1], 研究嵌岩桩临界嵌岩长度等重要特性^[2], 也可以推导或修正设计参数如地基系数的比例系数 m 值等^[3], 为研究提供经验指导。但现场试验尤其是嵌岩桩基的施工加载等费用昂贵, 花费时间长, 且试验容易受到外部环境干扰而导致结果出现误差。此外, 某一处现场试验得出的结果往往只适用于地质条件和桩基尺寸相近的情况, 不具备普遍性。实验室模型试验与现场试验相比所需费用和时间大大降低, 受到的环境干扰相对较小, 因此也更方便进行多组试验系统地分析各个因素如荷载大小、桩岩相对刚度、钢护筒、基岩层面倾角等对桩基水平承载特性的影响^[4-6]。但如何制作与实际条件相近的模型是进行实验室试验前需要考虑的问题, 普通的缩尺模型试验由于尺寸效应及地基应力大小等原因, 与嵌岩桩的实际受力情况常常有较大差距, 如何准确模拟岩体地基的风化特性也是实验的一大难题。基于土工离心机等设备进行的缩尺模型试验能够更准确地模拟实际情况, 但技术流程更加复杂, 设备也较为昂贵。

随着计算机技术的发展, 数值模拟的理论技术与软件也在不断发展。相比于现场原位试验和室内模型试验, 数值模拟具有成本低、速度快、参数分析方便等特点, 能够系统、严格地分析某一因素对桩基水平承载特性的影响。但同时, 如何确定正确的网格划分方法、材料参数、边界条件等输入参数以及选择合理的本构模型来准确模拟桩的实际受力情况是进行数值模拟时面临的难点和问题, 通常也需要辅以现场或实验室试验结果对数值模型进行验证。基于数值模拟的诸多优点, 许多研究者都采用了数值模拟的方法来研究桩基的水平承载特性, 如在传统桩基水平承载力的研究中, 结合实验和数值模拟分析大直径桩的尺寸效应, 提出现有方法的不足^[7], 进而修正现有 p - y 曲线中的参数, 提出适用于大直径桩的计算方法^[8]; 针对嵌岩桩或岩石地基的特有的性质, 有学者建立离散元模型, 分析了岩体节理组数、节理产状等特性对于桩基水平承载特性的影响^[9], 或是基于岩体特征和岩体参数建立了横观各向异性的力学模型进行计算^[10]; 有的则尝试通过数值模型模拟桩基与地基之间受力相对运动发生分离的影响, 并进行参数分析, 证明了临界嵌岩深度的存在^[11]; 也有研究者针对扩底桩、斜坡桩等不同嵌岩桩的特性, 采用数值模拟分析研究了其水平承载能力^[12-13]; 还有研究者通过数值模拟对岩石强度刚度、风化特性、桩基尺寸等影响因素进行大量参数分析, 进而推导桩岩相互作用的 p - y 曲线及其中的重要参数, 得到嵌岩桩水平承载力的计算方法^[14-16]。但目前桩基尺寸、竖向荷载等因素对嵌岩桩水平承载特性的影响仍有不明之处, 临界嵌岩长度也没有明确的确定方法, 因此本文基于一个嵌岩桩水平承载现场试验, 使用有限差分法软件建立数值模型来模拟实际嵌岩桩的受力情况, 通过现场试验数据来检验建立的模型和分析方法的准确性, 对数值模型验证完成后在该数值模型的基础上对各个因素的影响进行分析, 进一步研究嵌岩桩的水平承载特性。

足^[7], 进而修正现有 p - y 曲线中的参数, 提出适用于大直径桩的计算方法^[8]; 针对嵌岩桩或岩石地基的特有的性质, 有学者建立离散元模型, 分析了岩体节理组数、节理产状等特性对于桩基水平承载特性的影响^[9], 或是基于岩体特征和岩体参数建立了横观各向异性的力学模型进行计算^[10]; 有的则尝试通过数值模型模拟桩基与地基之间受力相对运动发生分离的影响, 并进行参数分析, 证明了临界嵌岩深度的存在^[11]; 也有研究者针对扩底桩、斜坡桩等不同嵌岩桩的特性, 采用数值模拟分析研究了其水平承载能力^[12-13]; 还有研究者通过数值模拟对岩石强度刚度、风化特性、桩基尺寸等影响因素进行大量参数分析, 进而推导桩岩相互作用的 p - y 曲线及其中的重要参数, 得到嵌岩桩水平承载力的计算方法^[14-16]。但目前桩基尺寸、竖向荷载等因素对嵌岩桩水平承载特性的影响仍有不明之处, 临界嵌岩长度也没有明确的确定方法, 因此本文基于一个嵌岩桩水平承载现场试验, 使用有限差分法软件建立数值模型来模拟实际嵌岩桩的受力情况, 通过现场试验数据来检验建立的模型和分析方法的准确性, 对数值模型验证完成后在该数值模型的基础上对各个因素的影响进行分析, 进一步研究嵌岩桩的水平承载特性。

1 现场试验概况

本文中现场试验采用在代顿 (Dayton) 进行的试验桩水平加载试验结果^[17]。该试验进行时开挖到基岩顶面, 将桩基整体嵌入基岩中而无任何上覆土体。根据地质勘察结果, 基岩以软质到中等强度的灰页岩为主, 其中夹有石灰岩。灰页岩为薄层结构, 轻度风化、破碎到十分破碎。对钻孔采集的页岩岩样进行了直剪试验, 根据试验结果, 其残余摩擦角为 24° , 饱和单轴抗压强度为 39.08 MPa 。根据岩石强度等级、质量等级、节理的发展程度等进行岩石的RMR (Rock Mass Rating) 评级^[18], 如表1所示, 进而设置地下水状况等级为15并通过式(1)计算得到GSI (Geological strength index) 值。

$$\text{GSI} = \text{RMR}_{90} - 5 \quad (1)$$

试验加载布置如图1所示, 试验桩 (4号桩) 和反力桩 (3号桩) 均为直径 1.83 m 的预制钢筋混凝土桩, 桩身长度为 5.48 m , 试验桩与反力桩轴线

表 1 基岩 RMR 值和 GSI 值计算

Tab. 1 The RMR and GSI values of bedrock

| 深度 /m | 强度等级 | RQD 等级 | 节理 间距 | 节理 状况 | 地下水 状况 | RMR 均值 | GSI |
|-----------|------|--------|-------|-------|--------|--------|-----|
| 0~2.13 | 4 | 3~5 | 5~15 | 5~20 | 15 | 46 | 41 |
| 2.13~5.48 | 4~7 | 13 | 5~15 | 20~25 | 15 | 66 | 61 |

距离为 5.48 m，混凝土轴心抗压强度标准值为 31 MPa。水平荷载通过两根桩之间的千斤顶和反力梁施加，通过压力传感器测量施加的实际荷载。施加荷载时按 222.4 kN 或 444.8 kN 的增量逐级加载，最大施加荷载为 5.008 7 MN，最后进行卸载。

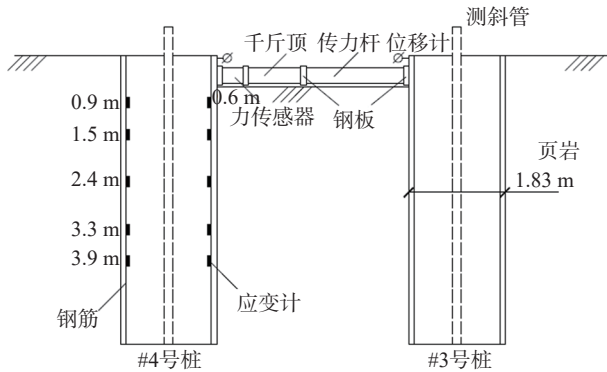


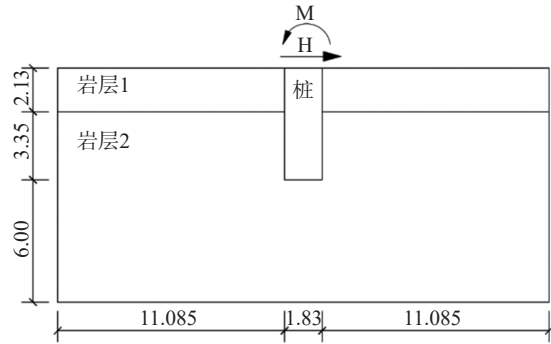
图 1 Dayton 桩基试验布置 (Yang, 2006)

Fig. 1 Layout of Dayton shaft test

2 数值模型的建立与验证

本文的数值模拟采用有限差分法软件 FLAC3D 进行，为了检验数值模型的准确性，首先基于上文现场试验建立数值模型。为了模拟无限大半平面的地基，减少边界约束对桩受力的影响，桩侧与侧边边界距离大于 5 倍桩径，桩底与下边界距离大于 1 倍桩长。地基模型侧边约束法向位移，下边界约束所有方向的位移。为简化模型，将地基顶面设置为与桩顶平面平齐，施加荷载时直接在桩顶施加水平荷载，并附加反向弯矩使得模型桩与试验桩所受荷载静力等效。建立的模型尺寸如图 2 所示。

模型中，桩基采用弹性本构模型，弹性模量取 26.2 GPa，泊松比取 0.15，密度为 2 500 kg/m³。基岩采用 Hoek-Brown 准则，泊松比假设为 0.3，由于基岩埋深低于地下水平面，其有效密度取 1 052 kg/m³；此外，按照岩石的种类和质地确定经验系数 m_i 值，再根据之前计算的 GSI 值，忽略干扰系数 D 的影响，通过下列经验公式可以计算得到 Hoek-



注：图中尺寸单位为 m。

图 2 数值模拟模型尺寸

Fig. 2 The size of numerical simulation model

Brown 准则中的各个参数 [17]，岩体的弹性模量也根据 GSI 值和岩石单轴抗压强度得到：

$$m_b = \exp\left(\frac{GSI - 100}{28}\right) m_i \quad (2)$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9}\right) m_i \quad (3)$$

$$a = 1/2 + 1/6(e^{-GSI/15} - e^{-20/3}) \quad (4)$$

最终，本模型中各参数的取值和计算结果如表 2 所示，其他参数根据岩样直剪试验结果取值：

表 2 Hoek-Brown 准则中各参数取值

Tab. 2 The values of the parameter in Hoek-Brown failure criterion

| 深度/m | GSI | m_i | m_b | s | a | E_m /GPa |
|-----------|-----|-------|-------|-------|-------|------------|
| 0~2.13 | 41 | 6 | 0.730 | 0.001 | 0.511 | 0.695 |
| 2.13~5.48 | 61 | 6 | 1.490 | 0.013 | 0.503 | 2.208 |

桩体与基岩之间设置接触面，接触面法向刚度及剪切刚度按式 (5) 进行计算，取 $k_s = k_n = 261$ GPa/m。由于接触面的强度输入参数采用的是 Mohr-Coulomb 准则中的粘聚力 c 与摩擦角 φ ，因此需要先根据 Hoek-Brown 准则参数推导地基岩体的 c 值与 φ 值 [18]，再近似取岩层参数的 0.5 倍作为接触面的输入参数，最终接触面取 $c = 0.862$ MPa， $\varphi = 13^\circ$ 。

$$k_n = k_s = 10 \max \left[\frac{K + 4G/3}{\Delta z_{\min}} \right] \quad (5)$$

式中： K 和 G 分别为相邻岩层的体积模量和剪切模量； Δz_{\min} 是接触面法向方向上连接区域的最小尺寸。

根据上述尺寸和参数使用 FLAC^{3D} 建模，并按照试验的加载流程逐级施加荷载，进行数值计算。加载完成后将各级荷载下桩顶和桩身的水平位移和

弯矩进行整理分析, 与试验桩测量的数据进行对比, 结果如图3~图4和图5所示:

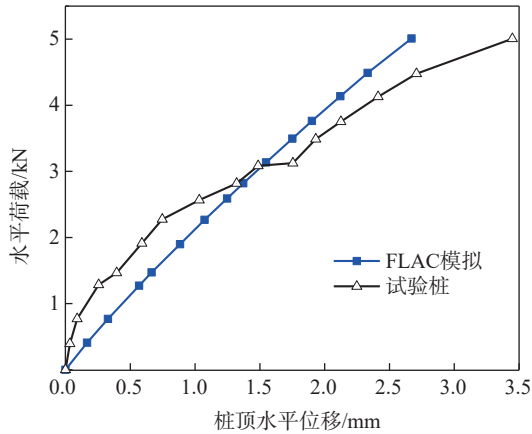


图3 数值模拟与试验桩桩顶荷载-位移曲线对比

Fig. 3 Comparison of load-displacement curves at pile top between numerical simulation and field test

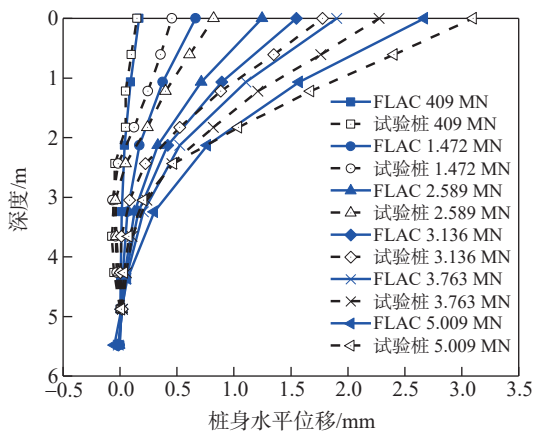


图4 数值模拟与试验桩的桩身位移曲线对比

Fig. 4 Comparison of displacement curves between numerical simulation and field test

图3中, 各级荷载下数值模拟得到的桩顶位移与实际情况大体较为接近。数值模拟结果中整体桩顶荷载-位移曲线基本为线性, 而试验桩的桩顶荷载-位移曲线则体现出一定的非线性, 模拟的结果与试验结果有所偏差, 分析原因, 一方面是因为加载过程中地基岩体刚度会发生变化, 由于现场试验中缺乏岩石围压试验的数据, 无法得到岩石的硬化或软化曲线, 进行数值模拟时输入的岩石刚度为恒定的; 另一方面, 试验现场试验过程中, 在位移1.5 mm时加载暂停, 在较长的时间内维持了当时的荷载, 导致曲线发生向右偏移, 数值模拟没有考虑这一影响, 这些因素综合导致数值模拟的结果与试

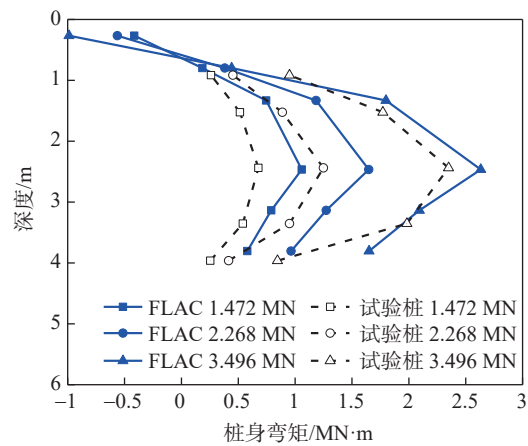


图5 数值模拟与试验桩的桩身弯矩曲线对比

Fig. 5 Comparison of moment curves between numerical simulation and field test

验结果产生一定的偏差。在不考虑岩石软化的情况下, 可以认为数值模拟的结果是可靠的。图4和图5进一步对比了桩身位移和桩身弯矩的计算结果, 数值模拟中的嵌岩桩在各级荷载下桩身整体的变形、弯矩大小以及变化趋势与试验结果都比较接近, 最大弯矩出现的位置也基本相同, 大约出现在距离地面2.5 m处, 与荷载位移曲线中出现的问题类似, 由于缺乏岩石刚度变化的数据导致与实际结果存在差距。

3 嵌岩桩水平承载特性影响因素分析

3.1 嵌岩桩尺寸对水平承载特性的影响

桩基的尺寸会改变桩的整体刚度, 影响桩土之间的相对刚度, 从而影响桩基的水平变形和承载力。规范中常用折算长度 α_L 来判断桩的类型与受力特点, 这实际上相当于对桩土相对刚度的度量。当 $\alpha_L < 2.5$ 时, 一般认为该桩基为短桩, 而当 $\alpha_L > 4$ 时则认为该桩基为长桩。前文现场试验中直径为1.83 m的嵌岩桩桩基变形系数 $\alpha = 0.646 \text{ m}^{-1}$ 。本文在该嵌岩桩的基础上, 改变桩的嵌岩长度, 模拟了嵌岩长度为1.64 d、2.30 d、3.00 d、3.93 d (即长度分别为3 m、4.2 m、5.48 m、7.2 m) 等不同条件下嵌岩桩的受力情况。各桩在水平荷载作用下桩身各点的位移如图6所示。当桩长为1.64 d时, 折算长度 $\alpha_L = 1.937$, 由图6 (a) 可知桩的水平位移随深度呈线性变化, 可见桩身整体发生了刚体转动, 几乎没有弹性变形, 符合刚性短桩的特性; 桩长为2.30 d和3.00 d时, α_L 分别为2.712和3.539, 由图6 (b) 和

(c) 可知水平位移随深度呈非线性变化，桩身开始发生弹性挠曲；桩长为 $3.93d$ 时， $\alpha_L=4.650$ ，为弹

性长桩，由图 6 (d) 可知其上半部分的桩体呈弹性挠曲，下半部分桩体则几乎没有水平位移。

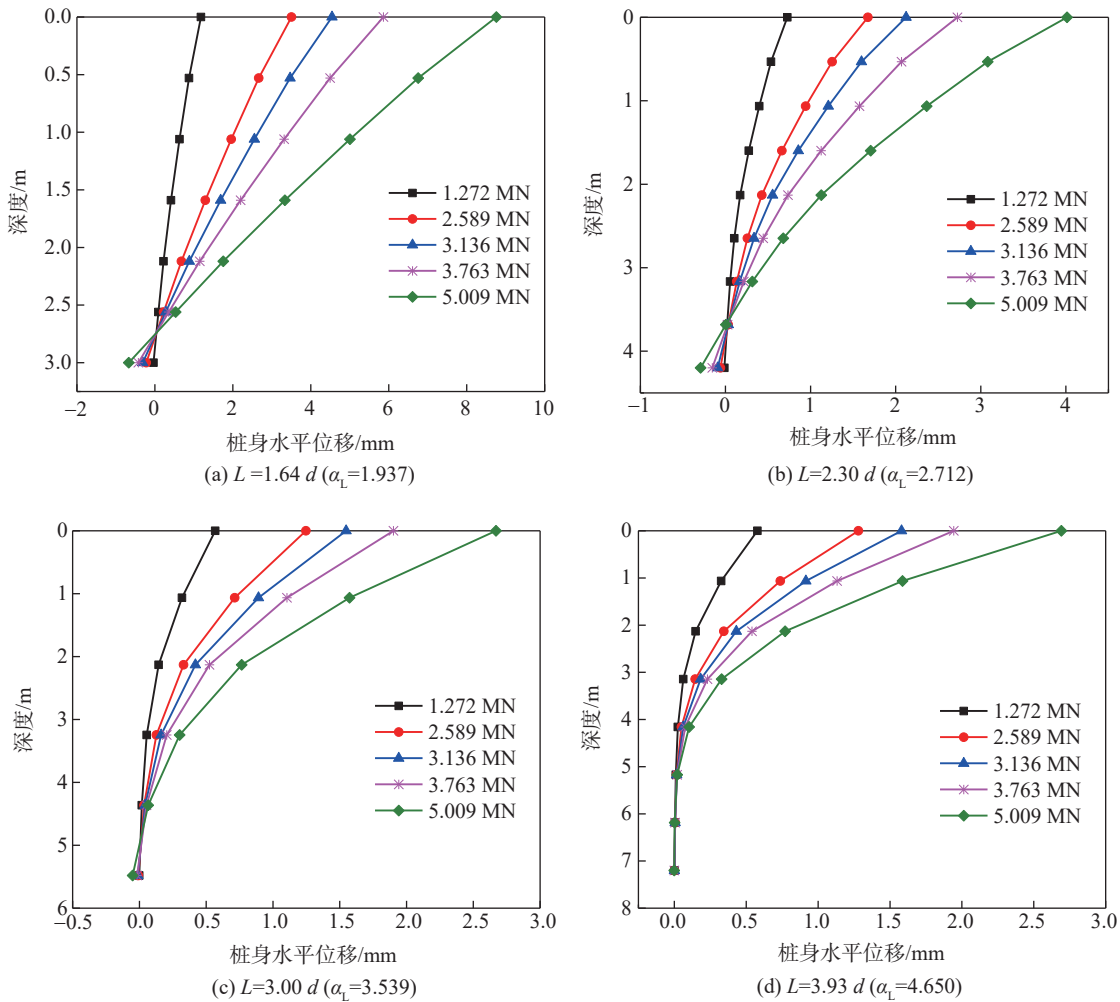


图 6 不同嵌岩长度下桩身位移曲线

Fig. 6 Deflection curves of piles with different lengths

不同桩长嵌岩桩桩顶的荷载位移曲线如图 7 所示，随着桩长增加，相同荷载下桩基的水平位移减小，水平承载能力增加，但桩长大于 $3d$ (5.48 m) 后若桩长继续增加，桩顶位移的变化极小，桩长为 $3.93d$ (7.2 m) 时的荷载位移曲线仍与桩长为 $3d$ (5.48 m) 时的曲线几乎完全重叠，这说明存在一个临界嵌岩长度，达到这一长度之后就很难再通过增加桩的嵌岩长度来提高其水平承载力，本文试验条件下临界嵌岩长度为桩径 3 倍，实际工程中需要根据实际情况确定临界嵌岩长度，设计合理的桩基尺寸。

水平荷载 $H=3.496\text{ MN}$ 时不同桩长嵌岩桩的截

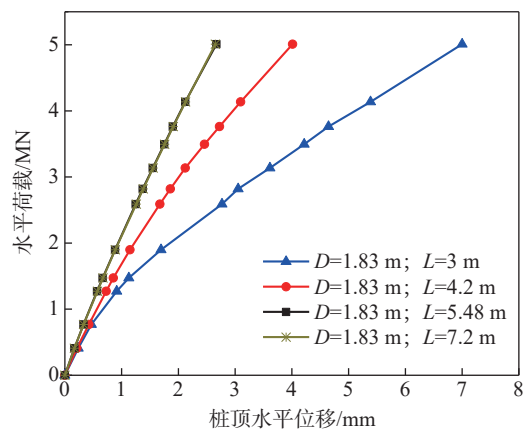


图 7 不同嵌岩长度下桩顶的荷载-位移曲线

Fig. 7 Load-displacement curves of piles with different lengths

面弯矩曲线如图8所示。随着桩长增加, 桩基截面弯矩逐渐增大, 在达到临界嵌岩长度 ($L=3d$) 之后弯矩变化较小。此外, 随着桩嵌岩长度增加, 直径与长度之比变得较小, 桩整体刚度也变小了, 因此 $L=1.64d$ 时在桩底附近仍有较大弯矩, $L=3.93d$ 时在接近 $L=3d$ 处弯矩已经很小, 到桩底则几乎没有弯矩。

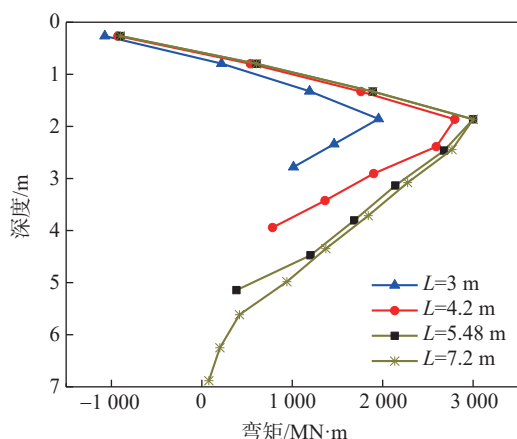


图8 $H=3.496$ MN时不同嵌岩长度桩基弯矩曲线
Fig. 8 Moment curves of piles with different lengths when $H=3.496$ MN

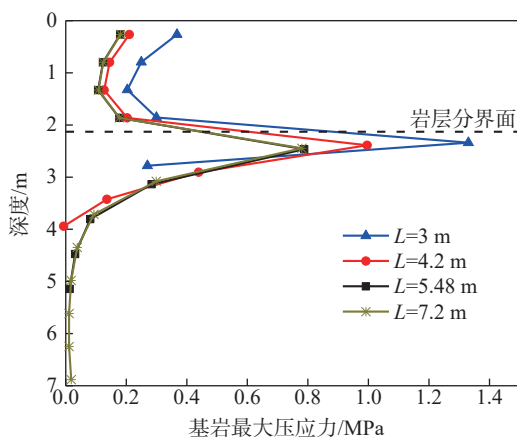


图9 $H=3.496$ MN时不同嵌岩长度桩基桩侧基岩反力曲线
Fig. 9 Bedrock reaction curves of piles with different lengths when $H=3.496$ MN

桩长不同时嵌岩桩桩侧基岩最大压应力曲线如图9所示。当深度较小时, 随着深度增加, 每根桩桩侧基岩受压的反力都逐渐减小, 但由于底部岩层的变形模量和GSI值比顶部岩石大很多, 相同形变下会提供更大的反力, 因此在接近两个岩层的分界面 (深度为2.13 m) 时桩侧反力增加, 并在岩层分界面附近发生突变达到最大值, 之后又再次随深

度减小。对比不同长度的嵌岩桩的基岩反力, 可以发现随着桩长增加, 桩侧基岩反力逐渐减小, 但在达到临界嵌岩长度之后, 基岩对桩体反力的变化就很小了。对于长度为 $3.93d$ 的桩, 可以明显看到当深度大于临界嵌岩长度 $3d$ 之后基岩对桩体已经几乎不产生反力, 可以认为该深度以下的岩体对桩身的位移的约束作用发挥程度已经很小。

嵌岩桩直径的变化也会显著改变桩土间的相对刚度, 从而使桩的受力特性发生改变。为了研究桩径对于桩基受力情况以及临界嵌岩长度的影响, 本文中取桩径分别为1 m、1.4 m、2.2 m的嵌岩桩与上文中的嵌岩桩进行分析, 对比相同荷载下的桩顶位移和位移变化率, 如图10和图11所示。其中位移变化率是指不同长径比时的桩顶位移与文中所取最大长径比时的桩顶位移相比的变化率。由图10可知随着桩径的减小, 在相同荷载下桩的水平位移显著增加; 而在相同桩径条件下, 随着嵌岩长度的增加, 桩顶位移虽不断减小, 但减小的幅度均在不断变小, 并在达到某一长径比后趋于稳定, 即上文提到的临界嵌岩长度 (长径比)。结合图11可以更直观地看出, 随着桩径的减小, 嵌岩桩的临界嵌岩长径比逐渐增加。 d 为2.2 m时, 临界嵌岩长度约在 $2.7d$ 左右, d 为1.83 m时则在 $3d$ 左右, d 为1.4 m和1 m时则分别达到了 $4.3d$ 和 $5.5d$ 以上。

综上所述, 桩长和桩径的增加虽然能减小桩基水平位移以及桩截面和岩石地基中的应力, 但存在一个临界嵌岩长度 (长径比), 达到该长度后继续增加嵌岩长度对桩基承载能力 (位移和应力) 影响很小, 该深度以下岩石地基贡献的反力也很小。此外, 在本文荷载条件下, 随着桩径的减小, 嵌岩桩的临界嵌岩长径比逐渐增加。

3.2 竖向荷载对水平承载特性的影响

过去也有许多学者研究了竖向荷载对土体中桩基水平承载特性的影响, 分析了荷载水平、桩基长径比、桩-土相对刚度、土体类型等因素的影响^[19]。有文章指出, 竖向与水平耦合荷载作用下, 竖向荷载的 $P-\Delta$ 效应会更加显著, 会对桩基产生额外的弯矩, 使得水平位移增大^[20-21]。但其他研究又指出, 在水平荷载较小时, 竖向荷载的存在会减小桩的水平位移和桩身弯矩, 在水平荷载较大时, 水平位移才会增大^[22]。

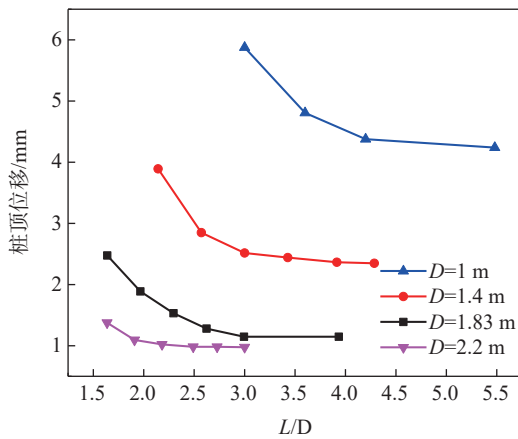


图 10 不同桩径条件下桩顶位移随长径比的变化

Fig. 10 The variation of displacement of piles with length-diameter ratios under different pile diameters

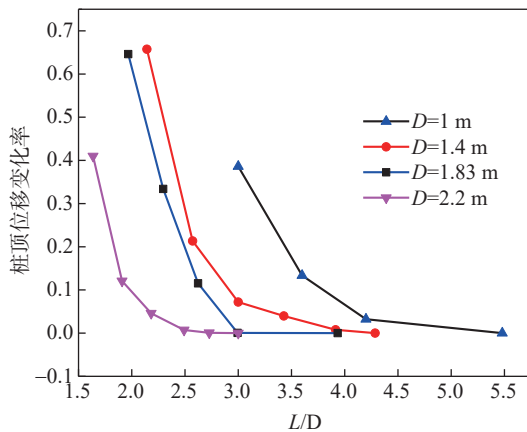


图 11 不同桩径条件下桩顶位移变化率随长径比的变化

Fig. 11 The variation of displacement gradients of piles with length-diameter ratios under different pile diameters

除了 $P-\Delta$ 效应，侧摩阻力的变化也是竖向荷载影响桩基水平响应的原因为。通常在计算承受竖向荷载的桩基时常常将地基对桩基的竖向侧摩阻力简化为作用于桩的轴线，而不是桩侧，但当桩基同时承受水平荷载时，竖向荷载引起的桩基两侧的竖向摩阻力不再相同，侧摩阻力施加在桩侧与施加在桩轴线相比相当于对桩产生了一个力偶，若依然假设侧摩阻力作用于桩的轴线，则会使得计算得到桩基弯矩与位移偏离实际情况^[23]。侧摩阻力的影响与 $P-\Delta$ 效应之间可能是相互抵消的，如果桩侧土体或基岩强度与变形模量较大，或桩径较大（长径比较小），则侧摩阻力引起的力矩较大，如果水平荷载的量级较大、上部结构悬臂长度较长或桩基埋入了厚度较大的软弱土层中， $P-\Delta$ 效应的影响则可能更为显

著，这两个效应相互作用，最终影响桩基水平位移和桩身弯矩。

基于前文中的桩径为 1.83 m、桩长为 5.48 m 的嵌岩桩模型，可以比较分析桩在同时承受竖向荷载和水平荷载以及不承受竖向荷载只承受水平荷载时的受力及变形情况。根据《公路桥涵地基与基础设计规范》^[24]，支承在基岩上或嵌入基岩内的单桩轴向受压承载力容许值可按下式计算：

$$[R_a] = c_1 A_p f_{rk} + u \sum_{i=1}^m c_{2i} h_i f_{rki} + \frac{1}{2} \zeta_s u \sum_{i=1}^n l_i q_{ik} \quad (6)$$

式中： c_1 、 c_{2i} 为根据岩石强度、岩石破碎程度等因素确定的端阻力发挥系数，根据地勘报告，试验桩所在岩层为轻度风化、破碎到极破碎的岩石，因此取 $c_1=0.4$ ， $c_{2i}=0.03$ ； A_p 为桩端截面面积 (m^2)； u 为各土层或岩层部分的桩身周长 (m)； f_{rk} 为桩端岩石饱和单轴抗压强度标准值 (MPa)； h_i 为桩嵌入各岩层部分的厚度 (m)； m 为岩石层数；式中最后一项为上覆土层对桩身的侧摩阻力， ζ_s 、 l_i 、 q_{ik} 分别为土层的侧阻力发挥系数、厚度 (m) 和侧阻力标准值 (MPa)，由于本例无上覆土层，因此不需要将该项列入计算。

根据式 (6) 进行计算，本例中的嵌岩桩轴向受压承载力容许值 $[R_a] = 78 \text{ MN}$ ，因此进行数值模拟时取低于受压承载力容许值的不同竖向荷载进行加载。水平荷载为 5 MN 时，竖向荷载增大对桩身位移的影响如图 12 所示，可见在荷载未达到嵌岩桩竖向容许承载能力的前提下，随着竖向荷载增大，桩身位移不断减小，竖向荷载为 5 MN 时相比无竖向荷载时桩顶位移减小了约 4.7%，竖向荷载为 39 MN 时则减少了 27.7%；竖向荷载增大对桩身弯矩的影响如图 13 所示，可见承受竖向荷载时，桩身弯矩特别是下半部分的弯矩也大幅减小。

改变模型的荷载条件，对在不同水平荷载条件下（水平荷载分别为 5 MN、8 MN、10 MN）竖向荷载对桩基水平受力特性的影响进行模拟，并比较不同竖向荷载下桩顶位移相比无竖向荷载时的减小率，如图 14 所示，结果表明竖向荷载的存在均使桩基的水平位移有所减少（减小率均为正值）。之所以没有出现其他文献描述的竖向荷载引起水平位移增加的情况，可能是因为本文中的嵌岩桩既无悬臂自由段也无上覆土层，而是直接嵌在岩石之中，荷载作用平面也与岩面平齐，因此 $P-\Delta$ 效应的作用

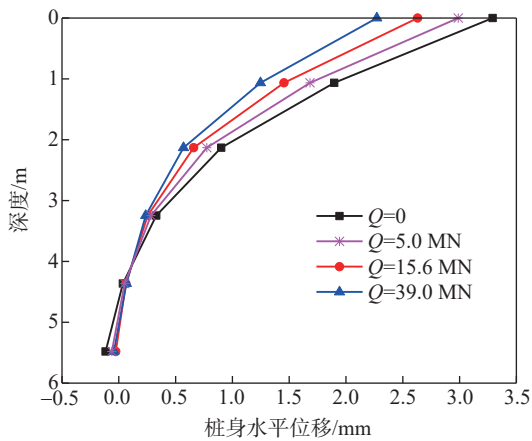


图 12 $H=5$ MN 时竖向荷载对水平承载桩水平位移的影响
 Fig. 12 Influence of vertical loads on horizontal displacement of the horizontal bearing pile when $H=5$ MN

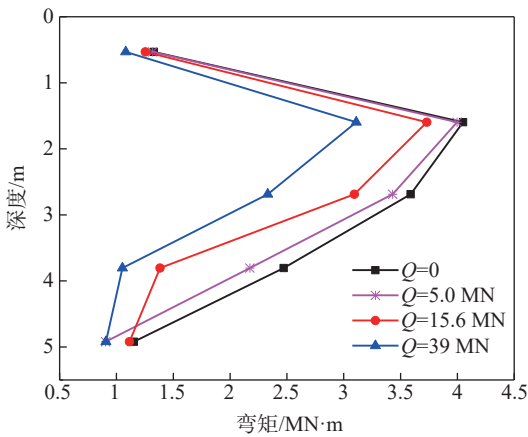


图 13 $H=5$ MN 时竖向荷载对水平承载桩弯矩的影响
 Fig. 13 Influence of vertical loads on moment of the horizontal bearing pile when $H=5$ MN

很小。同时可以看出, 随着竖向荷载增大, 水平位移减小率也越来越大, 但在水平荷载较大时, 当竖向荷载增大到一定水平后, 水平位移 (减小率) 趋近于一个极限值, 继续增加竖向荷载对水平位移的影响就很小了, 尤其是在水平荷载更大时, 水平位移会更快地达到这一极限值, 竖向荷载对水平位移的影响也更小。

为了验证竖向荷载影响嵌岩桩水平承载力的原理, 将以下三种情况下桩侧的侧摩阻力进行比较: (1) 仅受 5 MN 的水平荷载时的侧摩阻力; (2) 计算桩基单独承受 5 MN 的水平荷载以及单独承受 39 MN 竖向荷载时桩侧的摩阻力, 将这两个侧摩阻力简单叠加; (3) 承受水平与竖向耦合荷载时的侧摩阻力。侧摩阻力的计算结果如图 15 所示。应力

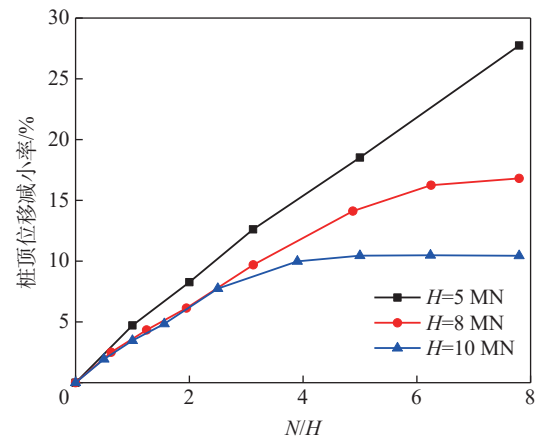


图 14 不同水平荷载下竖向荷载对桩顶水平位移的影响
 Fig. 14 The influence of vertical load on horizontal displacements of piles under different levels of horizontal loads

为正值代表基岩对桩的侧摩阻力方向向上, 负值则相反。

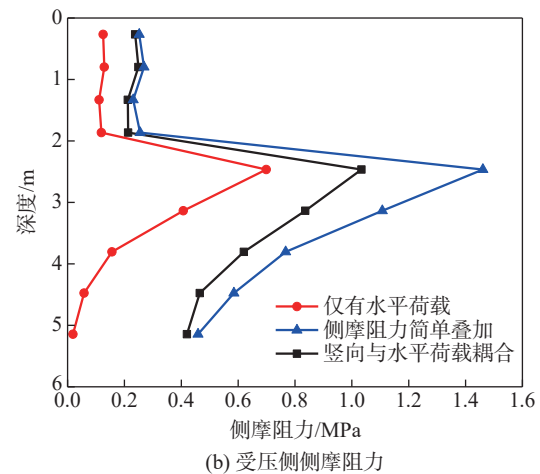
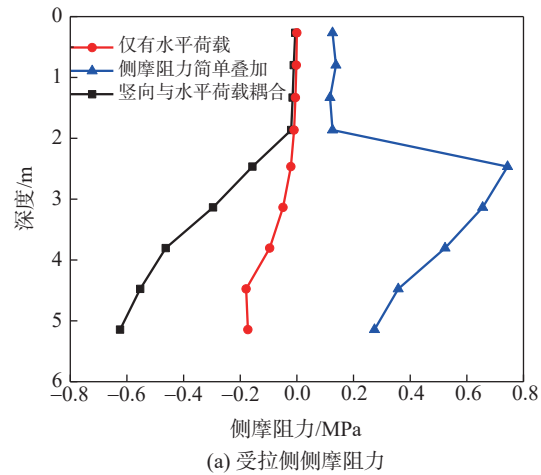


图 15 竖向荷载对桩侧侧摩阻力的影响
 Fig. 15 Influence of vertical load on side frictions of piles

由图可知,情况(1)时,桩仅受水平荷载,在受压侧基岩对桩体的侧摩阻力方向向上,在受拉侧基岩对桩体的侧摩阻力方向向下,即地基侧摩阻力对桩体有一个反向力矩的作用;仅受竖向荷载时两侧的侧摩阻力均向上,侧摩阻力对桩体没有力矩作用,因此情况(2)时将仅受水平荷载和仅受竖向荷载时的侧摩阻力简单叠加,受压侧基岩对桩体向上的侧摩阻力会增加,而在受拉侧基岩对桩体向下的侧摩阻力会减小甚至变为方向向上,应力简单叠加后侧摩阻力对桩的力矩大小与只承受水平荷载时的力矩是相同的;但实际在情况(3)中,在承受竖向和水平耦合荷载时,受压侧基岩对桩体向上的侧摩阻力增加,但受拉侧基岩对桩体向下的侧摩阻力却反而增大,这就相当于承受耦合荷载时相对于只承受水平荷载时(或应力简单叠加时)侧摩阻力对桩体的反向力矩变大了。因此在反向力矩作用下承受耦合荷载时桩体的水平位移和弯矩都减小了,而如果计算时把侧摩阻力作用在桩的轴线,则显然忽略了这一效应。而竖向荷载会增加水平位移的现象,可能主要是 $P-\Delta$ 效应的影响,上文计算的桩基桩长较短, $P-\Delta$ 效应不显著,而侧摩阻力提供的反向力矩的影响更大,因此没有出现竖向荷载引起水平位移增加的情况。

4 结 论

本文主要基于现场试验结果进行FLAC3D数值模拟,分析了桩基尺寸与竖向荷载对于嵌岩桩水平承载力的影响,最终得到以下结论:

1) 桩长和桩径的增加能提高嵌岩桩的水平承载能力,减小水平位移以及桩截面和岩石地基中的应力,但桩长的增加会使桩截面弯矩增大。

2) 对于嵌入岩石的桩基存在一个临界嵌岩长度(长径比),在达到临界深度前,随着桩径的减小,嵌岩桩的临界嵌岩长径比逐渐增加,在本文试验和模型条件下,岩石地基中桩径 d 为2.2 m时,临界嵌岩长度约在 $2.7d$ 左右, d 为1.83 m时则在 $3d$ 左右, d 为1.4 m和1 m时则分别达到了 $4.3d$ 和 $5.5d$ 以上。

3) 在桩的承载能力范围内,在竖向荷载与水平荷载共同作用下,若基岩条件较好或桩径较大,竖向荷载的增大会导致嵌岩桩桩侧竖向侧摩阻力对

桩身的反向力矩增大,使得嵌岩桩在水平荷载作用下的水平位移和桩身弯矩有较大幅度的减小,如果认为竖向荷载引起的侧摩阻力在桩的两侧大小与方向相同,或将竖向侧摩阻力简化为作用在桩的轴线则会忽略这一效应的影响,对计算结果造成误差。

4) 本文岩石地基条件下,不同水平荷载条件下竖向荷载的存在均使桩基的水平位移有所减少,且随着竖向荷载增大,水平位移越来越小,但在竖向荷载增大到一定水平后,继续增加竖向荷载对水平位移的影响就很小了,水平位移达到一个极限值,在水平荷载较大时,水平位移减小率会更快地达到这一极限值,竖向荷载对水平位移的影响也更小。

参考文献:

- [1] 刘述丽,易神州,张昆. 海上大直径钢管桩水平向桩土界面参数试桩分析[J]. 水利水电技术,2018,49(5):205-212.
LIU S L, YI S Z, ZHANG K. Analysis on trial pile for horizontal pile-soil interface parameters of large diameter offshore steel-pipe pile [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49(5):205-212.
- [2] 郭骞,吴宪锴,杜海鑫. 浑河大桥嵌岩桩水平加载试验研究[J]. 水利与建筑工程学报,2017,15(5):144-148.
GUO Q, WU X K, DU H X. Horizontal loading test of piles embedded in Hun River Bridge [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2017, 15(5):144-148.
- [3] 劳伟康,周治国,周立运. 水平推力桩在大位移情况下 m 值的确定[J]. 岩土力学,2008,29(1):192-196.
LAO W K, ZHOU Z G, ZHOU L Y. Analysis of m value for lateral loaded pile under large deflection [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(1):192-196.
- [4] 李鹏飞. 基于大比尺模型试验的钢护筒嵌岩桩承载特性研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2015.
LI P F. Study on bearing capacity of rock-socketed pile with steel casing based on large scale model test [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2015.
- [5] 王多垠,兰超,何光春,等. 内河港口大直径嵌岩灌注桩横向承载性能室内模型试验研究[J]. 岩土工程学报,2007,29(9):1307-1313.
WANG D Y, LAN C, HE G C, et al. Researches on lateral support behavior of large diameter rock-socketed cast-in-place piles at river port by laboratory model test [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(9):1307-1313.
- [6] 张垚豪,赵其华,娄琛,等. 考虑基岩层面影响的水平受荷嵌岩桩模型试验研究[J]. 工程地质学报,2019,27(2):286-293.
ZHANG C H, ZHAO Q H, LOU C, et al. Model experimental

- study of rock socketed pile in slope strata subjected to horizontal loading [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2019, 27(2): 286-293.
- [7] 徐海滨, 吕鹏远, 杜修力. 基于现场试验的海上风电大直径单桩三维水平承载力研究 [J]. *水利水电技术*, 2020, 51(7): 154-160.
- XU H B, LÜ P Y, DU X L. Research on 3D horizontal bearing capacity of large diameter monopile of offshore wind power based on field test [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2020, 51(7): 154-160.
- [8] SORENSEN S P H, BRODBAEK K T, MOLLER M, et al. Evaluation of the load-displacement relationships for large-diameter piles in sand [C]//Topping B H V, Neves L F C, Barros R C. *Proceedings of the Twelfth International Conference on Civil, Scotland*, 2009. Scotland: Structural and Environmental Engineering Computing Civil-Comp Press, 2009: 244-262.
- [9] CHONG W L, HAQUE A, RANJITH P G, et al. Effect of joints on $p-y$ behaviour of laterally loaded piles socketed into mudstone [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2011, 48(3): 372-379.
- [10] LIANG R Y, SHATNAWI E S. Estimating subgrade reaction modulus for transversely isotropic rock medium [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2010, 136(8): 1077-1085.
- [11] 王建华, 陈锦剑, 柯学. 水平荷载下大直径嵌岩桩的承载力特性研究 [J]. *岩土工程学报*, 2007(8): 1194-1198.
- WANG J H, CHEN J J, KE X. Characteristics of large diameter rock-socketed piles under lateral loads [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007(8): 1194-1198.
- [12] 王俊林, 王复明, 任连伟, 等. 大直径扩底桩单桩水平静载试验与数值模拟 [J]. *岩土工程学报*, 2010, 32(9): 1406-1411.
- WANG J L, WANG F M, REN L W, et al. Horizontal static load test and numerical simulation of single large diameter under-reamed pile [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, 32(9): 1406-1411.
- [13] 王永艺, 周世良, 廖冬. 港口工程斜坡上嵌岩桩水平承载能力分析 [J]. *中国港湾建设*, 2018, 38(4): 6-11.
- WANG Y Y, ZHOU S L, LIAO D. Analysis on horizontal bearing capacity of slope rock-socketed pile in port engineering [J]. *China Harbour Engineering*, 2018, 38(4): 6-11.
- [14] GABR M A, BORDEN R H, CHO K H, et al. $P-y$ curves for laterally loaded drilled shafts embedded in weathered rock [R]. North Carolina: North Carolina State University, 2002.
- [15] LIANG R, YANG K, NUSAIRAT J. $P-y$ criterion for rock mass [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2009, 135(1): 26-36.
- [16] 张坤勇, 李广山, 杜伟, 等. 基于数值试验的嵌岩桩横向承载力研究 [J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2016, 48(6): 58-67.
- ZHANG K Y, LI G S, DU W, et al. Study on lateral bearing capacity of rock-socketed piles based on numerical tests [J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2016, 48(6): 58-67.
- [17] YANG K. Analysis of laterally loaded drilled shafts in rock [D]. Ohio: University of Akron, 2006.
- [18] BIENIAWSKI Z T. Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering [M]. New York: Wiley, 1989.
- [19] HAZZAR L, HUSSIEN M N, KARRAY M. Influence of vertical loads on lateral response of pile foundations in sands and clays [J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2017, 9(2): 291-304.
- [20] 张磊, 龚晓南, 俞建霖. 考虑土体屈服的纵横荷载单桩变形内力分析 [J]. *岩土力学*, 2011, 32(8): 2441-2445+2478.
- ZHANG L, GONG X N, YU J L. Analysis of deformation and internal force for single pile under combined vertical and lateral loads considering yielding of soil [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(8): 2441-2445+2478.
- [21] 陈林靖, 郑俊, 余其凤. 坡顶面复合荷载刚性短桩工程设计要素分析 [J]. *工程地质学报*, 2017, 25(6): 1593-1602.
- CHEN L J, ZHENG J, YU Q F. Analysis of design elements of incline load short rigid pile in slope crest zone [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2017, 25(6): 1593-1602.
- [22] LIANG F Y, ZHANG H, WANG J L. Variational solution for the effect of vertical load on the lateral response of offshore piles [J]. *Ocean Engineering*, 2015, 99(5): 23-33.
- [23] NIRLAULA L D. Development of modified $t-z$ curves for large diameter piles/drilled shafts in limestone for fb-pier [D]. Florida: University of Florida, 2004.
- [24] 中交公路规划设计院有限公司. 公路桥涵地基与基础设计规范: JTG 3363—2019 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2019.
- CCCC Highway Consultants Co., Ltd. Specifications for design of foundation of highway bridges and culverts: JTG 3363—2019 [S]. Beijing: China Communications Press, 2019.

作者简介:



张 力

张 力

1986-, 男, 江西南昌人, 水工结构室副主任, 高级工程师, 同济大学结构工程硕士, 主要从事水工、海工结构设计及研究 (e-mail) zhangli@gedi.com.cn。

赵学亮 (通信作者)

1974-, 男, 山西长治人, 东南大学副教授, 博士, 主要从事海洋岩土方向的科研与教学工作 (email) zhaoxl@seu.edu.cn。

(责任编辑 李辉)