

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2018.05.031

山区河流港口工程斜坡嵌岩桩 双向承载特性分析

周世良¹, 王永艺^{1,2}, 廖冬³

(1. 重庆交通大学 重庆西南水运工程科学研究所, 重庆 400016;

2. 大连理工大学 土木工程学院, 辽宁 大连 116024; 3. 重庆市乌江航道管理处, 重庆 408000)

摘 要: 针对山区河流港口工程斜坡嵌岩桩双向承载工况, 采用有限单元法进行数值模拟, 考虑材料与桩岩接触非线性影响, 通过单元生死功能, 建模过程考虑斜坡嵌岩桩施工与承载等流程, 构建斜坡-嵌岩桩三维模型, 在斜坡坡度参数变化的情况下, 对于不同双向荷载工况, 逐级施加竖向与水平荷载, 分析斜坡嵌岩桩的双向承载特性。研究阐明了斜坡坡度、竖向荷载和水平荷载等方面对双向承载的斜坡嵌岩桩承载特性(桩顶沉降、水平位移、桩身弯矩和反弯点位置等)的影响规律, 可为实际工程双向承载斜坡嵌岩桩设计提供技术依据。

关键词: 山区河流; 港口工程; 斜坡; 嵌岩桩; 双向承载

中图分类号: TU473.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2018)05-0162-06

Analysis of Bidirectional Bearing Characteristics of Slope Rock-socketed Pile in Port Engineering in Mountain Rivers

ZHOU Shiliang¹, WANG Yongyi^{1,2}, LIAO Dong³

(1. Southwest Water Transport Engineering Research Institute, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400016, China;

2. School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China;

3. Wujiang Waterway Administration, Chongqing 408000, China)

Abstract: Focusing on bidirectional load condition of slope rock-socketed pile in port engineering in mountainous river, a finite element program ABAQUS is selected to simulate the modeling process which includes drilling in rock slope, pouring pile concrete, bearing load condition of pile foundation etc. The nonlinear effects of material and pile-rock contact are considered when three-dimensional models of the slope rock-socketed pile system are developed. The bidirectional bearing characteristics of slope rock-socketed pile are analyzed by changing parameters of slope angle and applying vertical and horizontal load at different levels etc. Research results indicate the influence of slope angle, vertical load and horizontal load on the bearing characteristics (settlement of pile top, horizontal displacement, bending moment of pile body, position of reverse bending point etc.) of bidirectional loaded slope rock-socketed pile, which can provide technical basis for the design of bidirectional bearing slope rock-socketed pile in actual engineering.

Keywords: mountain river; port engineering; slope; rock-socketed pile; bidirectional bearing

港口桩基常常受到竖向与水平荷载同时作用。对于双向荷载作用下桩基的设计, 一般是把荷载竖向与水平分力分开考虑, 接着根据叠加原理算出桩身内力与位移, 但此简化方法只适合线弹性小变形的情况。

此外, 嵌岩桩在斜坡与平地情况下的承载机理有显著差异, 但有关规范仍将斜坡桩基按平地桩基考虑设计, 势必会存在一定误差。

杨校辉等^[1]通过现场静力压桩试验与载荷试

收稿日期: 2018-06-15

修稿日期: 2018-07-23

基金项目: 宁波市交通运输科技项目(201704)

作者简介: 周世良(1972—), 男, 浙江宁波人, 教授, 主要从事水工结构、岩土工程方面的研究与教学工作。E-mail: ZHSL1972@163.com

通讯作者: 王永艺(1991—), 男, 福建南安人, 博士研究生, 研究方向为岩土工程、港口海岸及近海工程。E-mail: 594645902@qq.com

验,认为在压桩荷载增大过程中,桩身上部侧摩阻力较先达到极限状况,应该适当增强桩身中上部设计。戈迅等^[2]进行不同坡度的斜坡场地单桩水平荷载现场实验,认为在荷载增大过程中,桩后与桩前被动土压力的比值存在先降低后升高,再趋缓,而随着坡度增大,在桩土作用后期,桩后被动土压力显著增大。张宇等^[3]进行双向水平循环荷载作用下,单桩承载力的离心模型试验,认为桩身弯矩与桩端反力几乎呈线性关系,弯矩最大值大概在三分之一埋深位置,随着水平位移和循环次数的增加,桩体转动中心最终稳定在三分之二埋深位置。杨明辉^[4]、尹平保^[5]认为斜坡桩基双向承载性状,和成桩过程、桩类型、桩长、地基土性质等方面相关,其破坏情况包含竖向或水平单独承载时各种可能存在的状况。刘建华^[6]认为岩质斜坡桩基双向承载受力性能不等于竖向承载桩基受力性能和水平承载桩基受力性能的简单迭加,斜坡桩基双向承载受力性能要复杂得多,其中水平荷载作用下桩身产生较大位移与弯矩,竖向荷载在桩身挠曲变形情况下会生成附加弯矩。鲁志杰等^[7]理论分析坡顶桩基受力状态,并对比分析试验结果与理论计算值,验证理论方法可靠性。张建伟^[8]采用 ABAQUS 软件对竖向及水平荷载共同作用下的斜坡桩基进行数值计算,认为在先施加竖向作用力再施加水平作用力情况下,竖向荷载的增大能有效减小桩顶水平位移,降低桩身弯矩,且在竖向荷载一定的情况下,桩顶沉降及水平位移随水平荷载的增大而增大,但该研究未考虑斜坡施工钻孔、桩混凝土浇筑等流程。

本文通过单元生死功能,考虑材料与桩岩接触非线性影响,通过单元生死功能,建模过程考虑斜坡嵌岩桩施工与承载等流程,构建斜坡-嵌岩桩三维模型。

1 斜坡嵌岩桩有限元法

1.1 参数取值

桩体采用 C30 钢筋混凝土,其参数见表 1,建模的计算单元采用 C3D8R 单元;岩体为砂岩,采用弹性材料 Mohr - Coulomb 模型,其参数根据相关文献^[9-12]及规范^[13-14]确定,具体参数见表 2。

表 1 桩体材料参数			
材料	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν	重度 γ $/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$
钢筋混凝土	30	0.2	25

表 2 岩体材料参数					
材料	黏聚力 c/MPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$	变形模量 E/MPa	重度 γ $/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	泊松比
软质砂岩	0.3	26	700	22.5	0.28

双向荷载作用下,桩体沉降位移值应在一定范围内(30 mm ~ 40 mm),不可过大^[15-16]。为分析斜坡坡度、竖向荷载、水平荷载等参数对斜坡嵌岩桩双向承载特性的影响规律,模型计算方案见表 3。地基体的长和宽均为 21 倍桩径,地基体平均高度为 17.5 倍桩径。

表 3 模型计算方案				
桩径 D/m	嵌岩深度 h	竖向荷载 Q_1/MN	水平荷载 Q_2/kN	斜坡坡度 $R/(\text{^\circ})$
2	7D	0、3、9、15、21、27	0、75、375、675、975、1125	0、15、30、45

注:双向荷载作用下,桩体沉降位移值应在一定范围内(30 mm ~ 40 mm),不可过大。经试算,最大竖向荷载取值 27 MN,最大水平荷载取值 1 125 kN。

1.2 接触面

选用库仑摩擦模型(罚摩擦)模拟桩岩接触区域桩侧与桩侧岩体的接触,参考相关文献^[9-12]及规范^[13-14],接触面间的摩擦系数取 0.55,选用面面接触、有限滑动来模拟;桩底与桩底岩体选用“tie”连接。图 1 为有限元模型网格划分图。

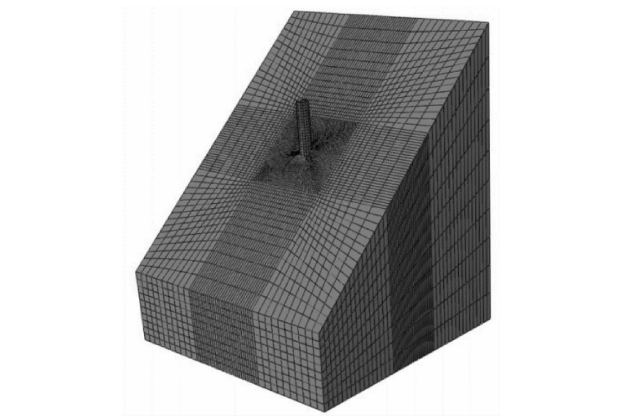


图 1 有限元模型网格划分图 ($R=45^\circ$ 、 $h=7D$ 、 $D=2\text{ m}$)

1.3 建模与加载方式

(1) 在 GeoStatic 分析步,先施加自重,然后“杀死”桩单元,地应力平衡(岩体变形控制在 10^{-6} m 量级),模拟钻孔。

(2) 提取地应力数值,作为初始应力,再“激活”桩单元,桩自重施加,桩底和桩侧与岩体的约束也随之产生,模拟桩混凝土浇筑。

(3) 桩基双向荷载施加顺序,对桩顶先逐级施

加竖向荷载(分级荷载 3 MN),再逐级施加水平荷载(分级荷载 75 kN),这种加载顺序能够较好地反映港口桩基的实际受力情况。

2 竖向荷载对双向受荷斜坡嵌岩桩承载特性的影响

2.1 竖向荷载对双向受荷斜坡嵌岩桩沉降位移的影响

桩径 $D = 2\text{ m}$,嵌岩深度 $h = 7D$,桩顶水平荷载 $Q_2 = 1\,125\text{ kN}$ 的斜坡嵌岩桩,不同桩顶竖向荷载工况($Q_1 = 0\text{ MN}$ 、 3 MN 、 9 MN 、 15 MN 、 21 MN 、 27 MN)的桩顶荷载 - 桩顶沉降曲线见图 2;桩顶荷载 - 桩顶水平位移曲线见图 3。

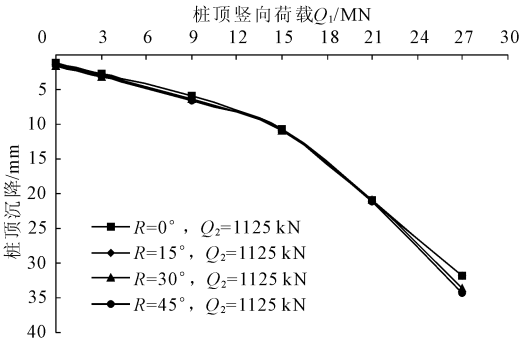


图 2 桩顶荷载 - 桩顶沉降曲线

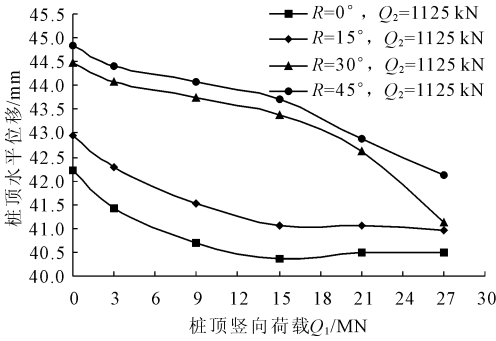


图 3 桩顶荷载 - 桩顶水平位移曲线

由图 2 可知,对于本文工况的斜坡嵌岩桩,以桩顶竖向荷载 $Q_1 = 15\text{ MN}$ 为分界点,当桩顶竖向荷载 $Q_1 \leq 15\text{ MN}$ 时,桩顶沉降随着桩顶竖向荷载的增加缓慢增大, $Q - S$ 曲线处于缓变段;当 $Q_1 > 15\text{ MN}$ 时,则桩顶沉降加剧, $Q - S$ 曲线处于陡降段。其中,当 $Q_1 > 21\text{ MN}$ 时,斜坡坡度对桩顶沉降的影响逐渐增强。斜坡坡度 $R \leq 15^\circ$ 时,随竖向荷载的增加,沉降幅度相近;坡度 $R > 15^\circ$ 时,沉降幅度随竖向荷载的增加而明显加大。

由图 3 可知,桩径 $D = 2\text{ m}$,嵌岩深度 $h = 7D$,桩顶水平荷载 $Q_2 = 1\,125\text{ kN}$ 的斜坡嵌岩桩,以桩顶竖

向荷载 $Q_1 = 15\text{ MN}$ 为分界点,斜坡坡度 $R \leq 15^\circ$, $Q_1 \leq 15\text{ MN}$ 的嵌岩桩,桩顶水平位移随着竖向荷载的增加快速减小,当 $Q_1 > 15\text{ MN}$ 时,则趋于稳定;斜坡坡度 $R > 15^\circ$, $Q_1 \leq 15\text{ MN}$ 的嵌岩桩,桩顶水平位移随着竖向荷载增加缓慢减小,当 $Q_1 > 15\text{ MN}$ 时,则加速减小。

可见,竖向荷载对双向承载斜坡嵌岩桩沉降和水平位移的影响应考虑坡度和竖向荷载的大小。以本文工况为例,对于坡度 $R \leq 15^\circ$ 的斜坡嵌岩桩,只要控制竖向荷载在一定范围内($Q_1 \leq 15\text{ MN}$),就能很好地限制桩顶沉降和水平位移;而当竖向荷载超过一定范围时($Q_1 > 15\text{ MN}$),对桩顶水平位移的抑制作用已不明显,而且桩顶沉降显著增加。而坡度 $R > 15^\circ$ 的嵌岩桩,竖向荷载较小时($Q_1 \leq 15\text{ MN}$),其对桩顶水平位移的抑制作用相对较弱;竖向荷载较大时($Q_1 > 15\text{ MN}$),竖向荷载的增加会加剧桩顶沉降,同时对桩顶水平位移的抑制作用显著增加。因此,在工程设计中应综合考虑竖向荷载变化对桩顶沉降的影响和限制水平位移的贡献。

2.2 竖向荷载对双向受荷斜坡嵌岩桩桩身弯矩的影响

桩径 $D = 2\text{ m}$,嵌岩深度 $h = 7D$,桩顶水平荷载 $Q_2 = 1\,125\text{ kN}$ 的斜坡嵌岩桩,在不同的桩顶竖向荷载作用下桩身弯矩分布曲线(以 $R = 45^\circ$ 为例)见图 4;桩顶荷载 - 桩身弯矩最大值曲线见图 5。

由图 4 可知,对于本文工况的斜坡嵌岩桩,在竖向荷载增大过程中,桩身弯矩分布曲线均呈“S”型分布,与平地桩基受荷情况类似。

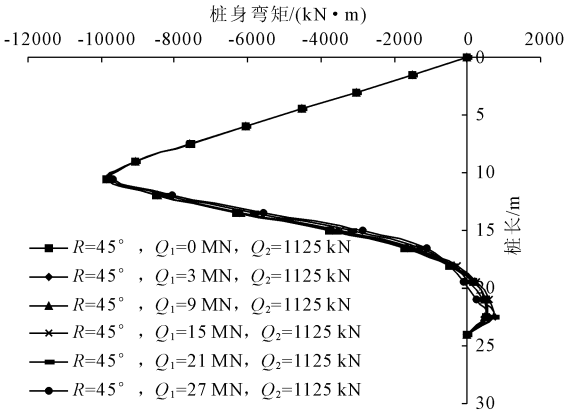


图 4 桩身弯矩分布曲线($R = 45^\circ$)

由图 5 可知,当坡度 $R \leq 15^\circ$ 时,桩身弯矩最大值随着竖向荷载的增加呈陡降—趋缓(或略有波动)的变化规律。 $Q_1 \leq 15\text{ MN}$ 时,在桩顶竖向荷载作用下,桩前岩体受到桩体传递的压应力影响,产生紧密

挤压,岩体抗剪强度得到一定提高,在抵抗外力方面桩身弯矩最大值有所减小; $Q_1 > 15$ MN 时,由于桩顶水平荷载的作用,桩身存在挠曲变形,而竖向荷载的增加虽能在一定程度上抑制桩身变形,但仍产生附加弯矩,使得桩身弯矩最大值略微增加或波动。

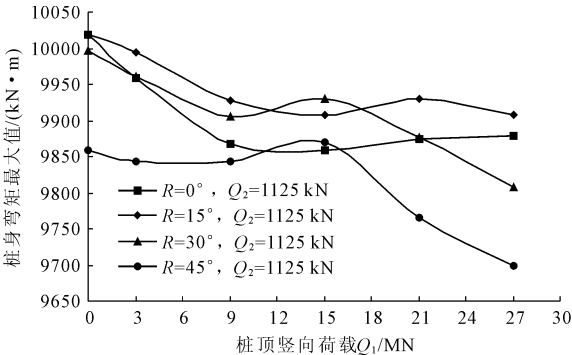


图 5 桩顶荷载 – 桩身弯矩最大值曲线

当坡度 $R > 15^\circ$ 时,在竖向荷载增大过程中,桩身最大弯矩值呈减小—增大—陡降的变化规律。 $Q_1 \leq 9$ MN 时,同样由于竖向荷载提高桩周岩体抗剪强度,桩身弯矩最大值有所减小; $9 \text{ MN} < Q_1 \leq 15 \text{ MN}$ 时,竖向荷载和坡度越大,桩体发生向前位移的趋势增大,后期施加的水平荷载又会加大桩顶的向前位移,此时桩体水平位移下竖向荷载引起的附加弯矩越大,“P— Δ ”效应越显著; $Q_1 > 15$ MN 时,由于采用先施加竖向作用力后施加水平作用力的方式,此时一方面,竖向荷载越大,桩前岩体挤压作用越剧烈,桩前岩体抗剪强度明显提高,后期施加的水平荷载引起的桩身弯矩最大值随之减小;另一方面,竖向荷载增大到一定程度,斜坡岩体对桩嵌岩段的嵌固作用增强,桩自由段抵抗水平变形能力亦增强,桩体越不容易发生水平位移,此时竖向荷载引起的附加弯矩亦随之减小,因此,综合作用使得桩身弯矩最大值显著减小。

2.3 竖向荷载对双向受荷斜坡嵌岩桩反弯点位置的影响

桩径 $D = 2$ m,嵌岩深度 $h = 7D$,桩顶水平荷载 $Q_2 = 1\,125$ kN 的斜坡嵌岩桩,在不同的桩顶竖向荷载作用下桩身弯矩反弯点嵌岩深度与桩顶竖向荷载的关系 ($R = 0^\circ \sim 45^\circ$) 分别见图 6 ~ 图 9。

由图 6 ~ 图 9 可知,当坡度 $R \leq 15^\circ$ 时,反弯点嵌岩深度随着桩顶竖向荷载的增加呈“凸”型抛物线规律变化;当坡度 $R > 15^\circ$ 时,随着竖向荷载增加,随着竖向荷载增加,反弯点嵌岩深度呈“凹”型抛物线规律变化。

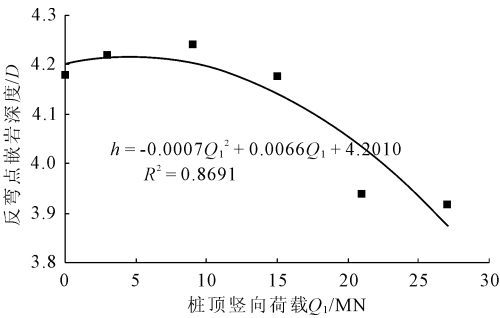


图 6 反弯点嵌岩深度与桩顶竖向荷载的关系 ($R = 0^\circ$)

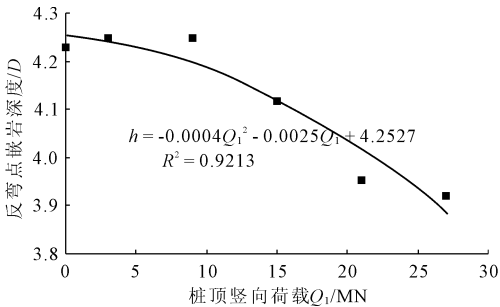


图 7 反弯点嵌岩深度与桩顶竖向荷载的关系 ($R = 15^\circ$)

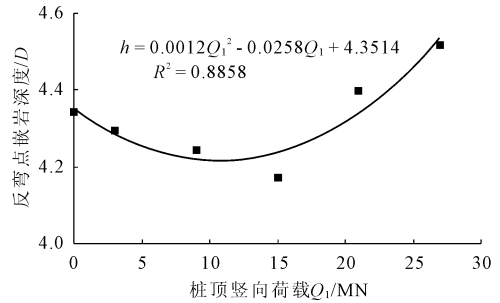


图 8 反弯点嵌岩深度与桩顶竖向荷载的关系 ($R = 30^\circ$)

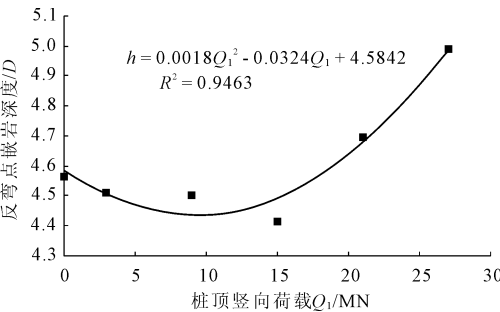


图 9 反弯点嵌岩深度与桩顶竖向荷载的关系 ($R = 45^\circ$)

反弯点以下岩体抗力和水平荷载方向一样,而反弯点以上岩体抗力和水平荷载方向相反(反弯点以上岩体是提供水平抗力的主要来源),其位置值得关注。当坡度较小时 ($R \leq 15^\circ$),随着竖向荷载的增大,一方面,受到桩体传递的压应力影响,桩前一定深度范围内的岩体抗剪强度得到提高,另一方面,桩体向前位移减小,综合使得参与水平承载的岩体减少,反弯点总体上移;当坡度较大时 ($R > 15^\circ$),随着

竖向荷载的增大,一方面,由于坡度较大,桩前岩体缺失效应加剧,桩体传递的压应力能够影响到桩前更深层的岩体,另一方面,桩体向前位移虽减小,但是仍较大,综合使得参与水平承载的岩体增多,反弯点总体下移。

3 水平荷载对双向受荷斜坡嵌岩桩承载特性的影响

3.1 水平荷载对双向受荷斜坡嵌岩桩沉降位移的影响

桩径 $D = 2\text{ m}$,嵌岩深度 $h = 7D$,桩顶竖向荷载 $Q_1 = 27\text{ MN}$ 的斜坡嵌岩桩,不同桩顶水平荷载工况 ($Q_2 = 0\text{ kN}, 75\text{ kN}, 375\text{ kN}, 675\text{ kN}, 975\text{ kN}, 1\,125\text{ kN}$) 的桩顶荷载 - 桩顶沉降曲线见图 10;桩顶荷载 - 桩顶水平位移曲线见图 11。

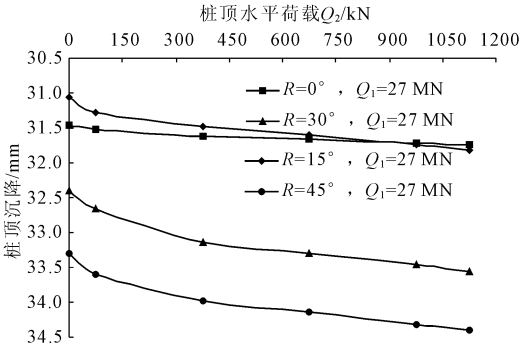


图 10 桩顶荷载 - 桩顶沉降曲线

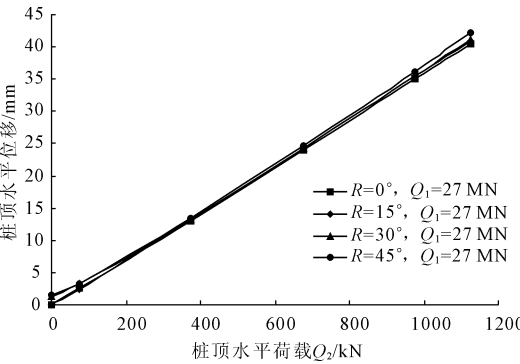


图 11 桩顶荷载 - 桩顶水平位移曲线

由图 10 可知,对于本文工况的斜坡嵌岩桩,当坡度 $R \leq 15^\circ$ 时,随着坡度和桩顶水平荷载增加,桩顶沉降程度相近;当坡度 $> 15^\circ$ 时,随着坡度增加,桩顶沉降明显加大,而随着桩顶水平荷载增加, $Q - S$ 曲线由非线性逐渐转为线性。

由图 11 可知,不同坡度下双向承载的斜坡嵌岩桩,随着水平荷载增加,桩顶水平位移大体上呈线性增加(这与本文桩自由长度取 10 m 有关)。其中,在

桩顶竖向荷载恒定时,随着坡度和桩顶水平荷载的增加,双向承载斜坡嵌岩桩仍具有坡度越大水平位移越大的规律,但与单纯水平受荷斜坡嵌岩桩相比,双向承载的桩基由于竖向荷载的约束作用,此规律被弱化(如图 3 所示,不同坡度的嵌岩桩桩顶水平位移随桩顶竖向荷载增加而趋近)。

3.2 水平荷载对双向受荷斜坡嵌岩桩桩身弯矩的影响

桩径 $D = 2\text{ m}$,嵌岩深度 $h = 7D$,桩顶竖向荷载 $Q_1 = 27\text{ MN}$ 的斜坡嵌岩桩,在不同的桩顶水平荷载下桩身弯矩分布曲线(以 $R = 45^\circ$ 为例)见图 12;桩顶荷载 - 桩身弯矩最大值曲线见图 13。

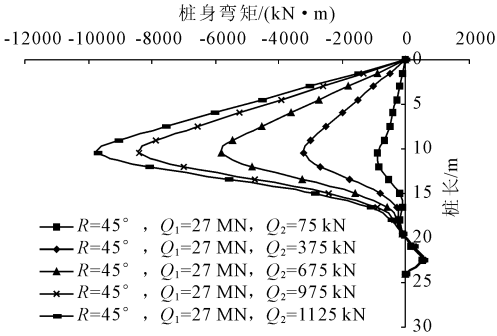


图 12 桩身弯矩分布曲线 ($R = 45^\circ$)

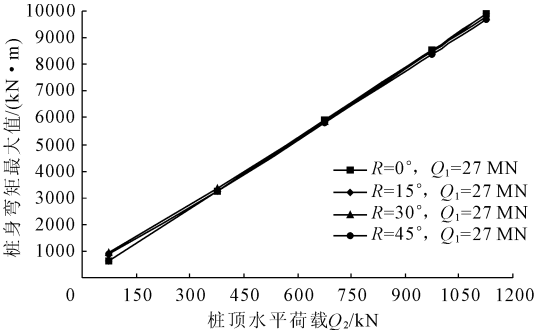


图 13 桩顶荷载 - 桩身弯矩最大值曲线

由图 12 可知,对于本文工况的斜坡嵌岩桩,当桩顶水平荷载 $Q_2 \leq 375\text{ kN}$ 时,桩身弯矩分布曲线呈不规则“S”型分布;当桩顶水平荷载 $Q_2 > 375\text{ kN}$ 时,随着水平荷载的增加,桩身弯矩分布曲线均呈较规则“S”型分布,这是弯矩分布(包括水平作用力引起的弯矩和竖向作用力引起的附加弯矩)随桩顶水平荷载的变化过程。

由图 13 可知,随着水平荷载增加,双向承载斜坡嵌岩桩(坡度 $R = 0^\circ \sim 45^\circ$)的桩身弯矩最大值基本上呈线性变化。其中,当水平荷载较小时 ($Q_2 = 75\text{ kN}$),坡度 $R = 0^\circ \sim 45^\circ$ 的嵌岩桩弯矩最大值 ($\text{kN} \cdot \text{m}$) 分别为 $638.6, 622.7, 934.2, 914.9$,变化幅度(与

平地桩基相比)分别为 0.00%、- 2.49%、46.29%、43.27%;当水平荷载较大时($Q_2 = 1\ 125\ \text{kN}$),坡度 $R = 0^\circ \sim 45^\circ$ 的嵌岩桩弯矩最大值($\text{kN}\cdot\text{m}$)分别为 9878、9907、9807、9698,变化幅度分别为 0.00%、0.29%、- 0.72%、- 1.82%。即水平荷载较小时,坡度对桩身弯矩最大值的影响较大,水平荷载较大时,坡度对桩身弯矩最大值的影响较小。

3.3 水平荷载对双向受荷斜坡嵌岩桩反弯点位置的影响

桩径 $D = 2\ \text{m}$,嵌岩深度 $h = 7D$,桩顶竖向荷载 $Q_1 = 27\ \text{MN}$ 的斜坡嵌岩桩,在不同的桩顶水平荷载下桩身弯矩反弯点嵌岩深度与桩顶水平荷载的关系($R = 0^\circ \sim 45^\circ$)分别见图 14~图 17。

由图 14~图 17 可知,双向承载斜坡嵌岩桩(坡度 $R = 0^\circ \sim 45^\circ$),反弯点嵌岩深度随着桩顶水平荷载的增加均呈“凹”型抛物线规律变化。

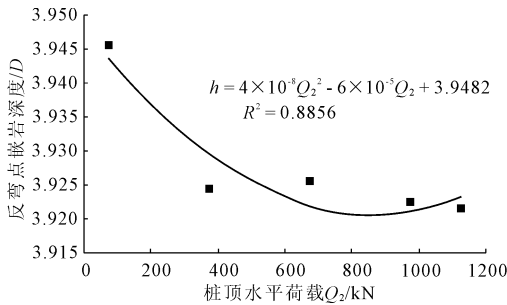


图 14 反弯点嵌岩深度与桩顶水平荷载的关系 ($R = 0^\circ$)

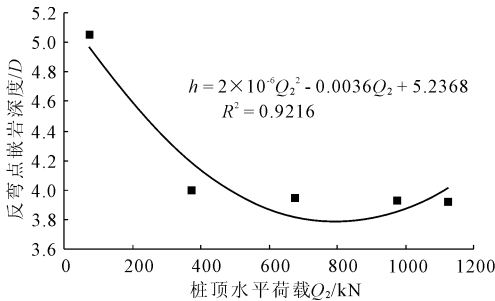


图 15 反弯点嵌岩深度与桩顶水平荷载的关系 ($R = 15^\circ$)

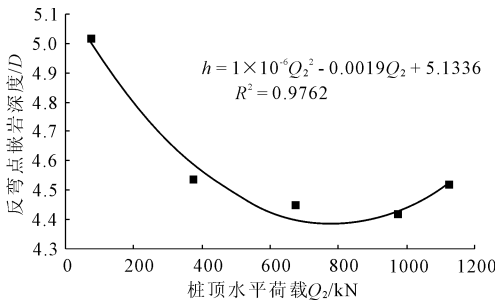


图 16 反弯点嵌岩深度与桩顶水平荷载的关系 ($R = 30^\circ$)

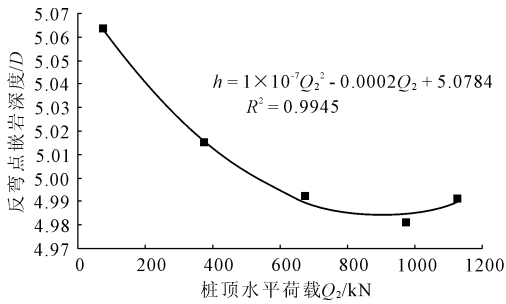


图 17 反弯点嵌岩深度与桩顶水平荷载的关系 ($R = 45^\circ$)

双向承载斜坡嵌岩桩,在桩顶恒定竖向荷载($Q_1 = 27\ \text{MN}$)下,随着水平荷载的增大,桩体挠曲变形逐渐增大,桩顶竖向荷载沿着桩体传递的性状会随之发生变化:当水平荷载较小时,桩体变形较小,桩顶竖向荷载能较好地沿桩体传递至岩体深部,使得更深层的岩体参与受力,因而反弯点在较深处;当水平荷载较大时,桩顶转动位移增加,桩体挠曲变形进一步增大,桩顶竖向作用力传递至桩前侧岩体深部的效果减小,使得桩前侧提供水平抗力的岩体范围向上有所缩减,反弯点在较浅处,但该范围内的岩体挤压状态更明显,压应力增强。

港口工程桩基规范^[16]指出,嵌岩灌注桩嵌岩段的配筋,应按照桩的受力分析确定,并在岩面附近加强配筋。本文基于位移功能要求(约 40 mm),对恒定水平或竖向荷载作用下斜坡嵌岩桩,分析得到不同坡度下($0^\circ \sim 45^\circ$)反弯点嵌岩深度随桩顶竖向或水平荷载增加的变化规律,可为实际工程确定桩体加强配筋方案作参考。

4 结 论

(1) 在工程设计中,应综合考虑竖向荷载变化对桩顶沉降的影响和限制水平位移的贡献。

(2) 竖向荷载对双向承载斜坡嵌岩桩桩身弯矩最大值的影响:当坡度 $R \leq 15^\circ$ 时,在竖向荷载增大过程中,桩身最大弯矩值呈陡降趋缓(或略有波动)的变化规律;当坡度 $R > 15^\circ$ 时,桩身最大弯矩值呈减小—增大—陡降的变化规律。

(3) 水平荷载对双向承载斜坡嵌岩桩沉降位移的影响:当坡度 $R \leq 15^\circ$ 时,随着坡度和桩顶水平荷载增加,桩顶沉降程度相近;当坡度 $> 15^\circ$ 时,随着坡度增加,桩顶沉降明显加大。当坡度 $R = 0^\circ \sim 45^\circ$ 时,随着水平荷载增加,桩顶水平位移大体上呈线性增加。

(上接第 167 页)

(4) 水平荷载对双向承载斜坡嵌岩桩桩身弯矩最大值的影响:随着水平荷载增加,双向承载斜坡嵌岩桩(坡度 $R = 0^\circ \sim 45^\circ$)的桩身弯矩最大值基本上呈线性变化。其中,当水平荷载较小时,坡度对桩身最大弯矩值的影响较大;当水平荷载较大时,坡度对桩身弯矩最大值的影响较小。

(5) 基于位移功能要求(约 40 mm),对恒定竖向荷载或恒定水平荷载作用下斜坡嵌岩桩,分析得到不同坡度下($0^\circ \sim 45^\circ$)反弯点嵌岩深度随桩顶水平荷载或竖向荷载增加的变化规律,可为实际工程确定桩体加强配筋方案作参考。

参考文献:

- [1] 杨校辉,朱彦鹏,黄雪峰.静压桩荷载传递与承载性状试验研究[J].水利与建筑工程学报,2016,14(1):139-143.
- [2] 戈 迅,赵其华,薛秋池.水平受荷桩桩土相互作用研究[J].水利与建筑工程学报,2018,16(1):36-39.
- [3] 张 宇,王忠涛,赵守正.双向水平循环荷载下单桩承载力的离心模型实验[J].水利与建筑工程学报,2014,12(4):27-31.
- [4] 杨明辉.岩质陡坡桥梁桩基承载机理及其分析方法研究[D].长沙:湖南大学,2006.
- [5] 尹平保.陡坡段桩柱式桥梁桩基设计计算方法及试验研究[D].长沙:湖南大学,2013.
- [6] 刘建华.岩质边坡桥梁基桩受力分析的理论与试验研究[D].长沙:湖南大学,2007.
- [7] 鲁志杰,年廷凯.坡顶斜向受荷桩内力及位移分析[J].燕山大学学报,2009,33(6):535-540.
- [8] 张建伟,孔庆梅,马金栋,等.复杂荷载共同作用下斜坡上单桩承载特性研究[J].建筑结构,2014(16):96-98.
- [9] 陈正鹏.港口工程软岩嵌岩群桩基础竖向承载性状与沉降计算方法研究[D].重庆:重庆交通大学,2013.
- [10] 李克森.高原库区软岩嵌岩桩竖向承载力性能研究[D].重庆:重庆交通大学,2012.
- [11] 关英俊.高原库区软岩嵌岩桩水平承载力性能研究[D].重庆:重庆交通大学,2012.
- [12] 胡少伟,孙岳阳,范向前.先张法预应力高强混凝土土波形板桩抗弯性能的试验研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2017,38(6):9-15.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部.工程岩体分级标准:GB/T 50218—2014[S].北京:中国计划出版社,2014.
- [14] 中华人民共和国交通运输部.港口岩土工程勘察规范:JTS 133 - 1—2010[S].北京:人民交通出版社,2010.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑地基基础设计规范:GB 50007—2011[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [16] 中华人民共和国交通运输部.港口工程桩基规范:JTS 167 - 4—2012[S].北京:人民交通出版社,2012.