

DOI: 10.11779/CJGE2024S10041

# 基于内聚力模型的嵌岩双斜桩水平承载特性分析

叶 青<sup>1,2</sup>, 郭 伟<sup>\*1,2</sup>, 任宇晓<sup>1,2</sup>, 庄道坤<sup>1,2</sup>, 崔赛月<sup>1,2</sup>

(1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072; 2. 滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072)

**摘要:** 基于已有的对桩-岩界面剪切特性的研究, 建立了界面几何参数和材料特性与内聚力模型参数间的转换关系, 与现场试验和理论研究对比, 验证了接触模型的准确性; 结合室内嵌岩双斜桩模型试验, 建立了对应有限元数值计算模型, 对比分析了桩基荷载-位移曲线与弯矩规律, 验证了模型的可靠性; 进而建立不同倾角的足尺嵌岩双斜桩模型, 分析在不同竖向定荷载下的水平承载特性。研究表明: 嵌岩双斜桩系统是多因素协同作用的承载系统, 对受多向组合荷载的嵌岩双斜桩而言, 存在一最优竖向设计荷载, 使得嵌岩双斜桩的水平承载力大大提高, 但过大的竖向荷载和过小的倾角反而提高桩承台失稳的风险。

**关键词:** 嵌岩双斜桩; 桩-岩接触; 模型试验; 数值模拟; 承载特性

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2024)S1-0233-06

作者简介: 叶 青(1995— ), 男, 博士研究生, 主要从事岩土工程方向研究。E-mail: yeqing\_1021@tju.edu.cn。

## Horizontal bearing characteristics of double-inclined rock-socketed piles based on cohesion model

YE Qing<sup>1,2</sup>, GUO Wei<sup>1,2</sup>, REN Yuxiao<sup>1,2</sup>, ZHUANG Daokun<sup>1,2</sup>, CUI Saiyue<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** Based on the existing researches on the shear characteristics of the pile-rock interface, the conversion relationship between the interface geometric parameters and the material properties and the parameters of the cohesion model is established. The accuracy of the contact model is verified by comparing with the field tests and theoretical studies. Combined with the indoor model tests on double-inclined rock-socketed piles, the corresponding finite element numerical model is established. The load-displacement curve and bending moment law of pile foundation are compared and analyzed, and the reliability of the model is verified. Then the full-scale model for the double-inclined rock-socketed piles with different dip angles is established to analyze the horizontal bearing characteristics under different vertical fixed loads. The results show that the rock-socketed system is a bearing system with synergistic effects of multiple factors. There is an optimal vertical design load that makes the horizontal bearing capacity of the double-inclined rock-socketed piles be greatly improved for are subjected to multi-directional combined loads. However, too large vertical loads and too small dip angles will increase the risk of pile cap instability.

**Key words:** double-inclined rock-socketed pile; pile-rock contact; model test; numerical simulation; bearing characteristic

## 0 引言

嵌岩斜桩由于其水平和竖向承载能力高、抗震性能好, 自 20 世纪 90 年代兴起后<sup>[1]</sup>, 以斜桩或斜直交互的群桩结构形式, 在高桩码头、桥梁基础、海洋钻井平台、海上风电基础等工程中得到广泛应用<sup>[2]</sup>。

Johnson 等<sup>[3]</sup>对引入接触面几何特性的影响, 对粗糙桩-岩界面接触特性进行了研究。赵明华等<sup>[4]</sup>考虑软岩的剪胀效应, 利用滑移线场法建立对应桩-岩剪切函数。Zhao 等<sup>[5]</sup>认为桩-岩界面存在初始胶结强度, 可一定程度上承担沿桩身传递的荷载。嵌岩斜群桩在不同受荷工况下的承载特性也是业界研究热点, 已有学

者对倾角、材料强度及几何参数等对桩基承载力的影响进行了研究<sup>[6]</sup>。Sakellariadis 等<sup>[7]</sup>研究了复合荷载下的双桩荷载响应机理。赵明华等<sup>[8]</sup>通过现场试验对高陡边坡上的桥梁嵌岩双桩受荷响应进行了研究。综上, 桩-岩结构面特性是嵌岩桩承载力研究的重点, 这也影响到不同形式、工况下桩的承载特性。

本文设计了嵌岩双桩的水平承载模型试验, 测试了不同倾角嵌岩双桩在不同竖向定荷载下的水平承载力及加载过程中的桩体响应。采用考虑桩-岩界面剪切

特性的内聚力模型, 建立嵌岩双柱在水平荷载下的有限元模型, 验证了模型准确性。基于该模型, 分析了嵌岩双斜柱的倾角对其荷载-位移规律、弯矩分布规律的影响, 总结了不同倾角嵌岩双斜柱的水平承载特性。

## 1 桩-岩界面接触模型

桩-岩界面接触属性是数值分析嵌岩桩承载机理的关键。赵明华等<sup>[4]</sup>以桩-岩界面粗糙体破坏为临界状态, 推导桩-岩界面的剪切行为如图 1 (a)。一般, 桩-岩界面的剪切应力发展服从图 1 (b) 所示的关系。

整个过程的剪切函数为

$$\tau = \begin{cases} K_r \tan \theta \tan(\varphi_b + \theta)s & (s \leq s_f) \\ K_r \tan \theta \tan \varphi_r s_f & (s > s_f) \end{cases}, \quad (1)$$

$$K_r = E_r / [(1+\nu)r]. \quad (2)$$

式中:  $K_r$  为岩石法向刚度;  $\theta$  为粗糙体剪胀角;  $\varphi_b$  为桩-岩界面摩擦角;  $s$  为剪切位移;  $\varphi_r$  为桩-岩界面残余摩擦角;  $s_f$  为粗糙体发生剪切破坏时的相对位移;  $E_r$  为岩石弹性模量;  $\nu$  为岩石泊松比;  $r$  为桩半径。

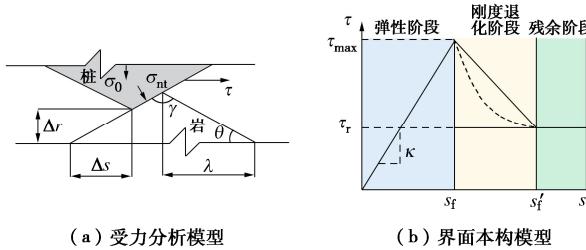


图 1 桩-岩界面接触模型

Fig. 1 Contact model for pile-rock interface

首先需要定义的参数是桩-岩界面的切向刚度  $K$

$$K = \tau_{\max} / s_f. \quad (3)$$

式中:  $\tau_{\max}$  为桩-岩界面粗糙体剪断剪应力极限值。

本文中采用最大位移准则定义黏结界面损伤的初始条件, 考虑弹-塑性孔壁法向刚度变化的损伤起始值  $\delta_n^0$  可由以下公式定义<sup>[9]</sup>:

$$\delta_n^0 = \frac{1+\nu}{E_r} (\sigma_{nl} - \sigma_0) r_0, \quad (4)$$

$$\sigma_{nl} = \Delta\sigma = K_r \Delta r. \quad (5)$$

式中:  $\sigma_{nl}$  为极限法向应力;  $\sigma_0$  为初始法向应力在钻孔灌注桩中桩成孔后岩石应力重新分布, 可近似认为初始法向应力为 0, 此时极限法向应力为桩-岩界面法向刚度退化时的法向应力增量  $r_0$  为初始桩径。

切向刚度的起始损伤条件可由以下公式定义<sup>[4]</sup>:

$$\delta_s^0 = \delta_t^0 = s_f = \frac{\lambda q_f}{q_f + 2\lambda K_r \tan \theta [\cos \theta + \sin \theta \tan(\varphi_b + \theta)]}. \quad (6)$$

式中:  $\lambda$  为岩石表面粗糙体的半波长;  $q_f$  是基于滑移线场法中无重力钝角楔体解答求得的极限应力<sup>[9]</sup>:

$$q_f = c \cot \varphi_b \left\{ \frac{1 + \sin \varphi_b}{1 - \sin \varphi_b} \exp[(2\gamma - \pi) \tan \varphi_b] - 1 \right\}. \quad (7)$$

式中:  $c$  为岩石黏聚力;  $\gamma$  为岩石表面粗糙体顶角。

为验证该接触模型可靠性, 参考 Gu 等<sup>[10]</sup>模型试验建立了分析桩-岩界面剪切特性的有限元模型见图 2 (a)。材料参数取值如下: 法向刚度  $K=800 \text{ kPa/mm}$ , 剪胀角  $\theta=20^\circ$ , 内摩擦角  $\varphi=33^\circ$ , 黏聚力  $c=2.3 \text{ MPa}$ , 泊松比  $\mu=0.1$ , 粗糙体半波长  $\lambda=10 \text{ mm}$ , 桩-岩结构面摩擦角  $\varphi_b=31^\circ$ , 桩-岩结构面残余摩擦角  $\varphi_r=26^\circ$ 。向加载端桩头施加位移, 得到位移支反力间关系。

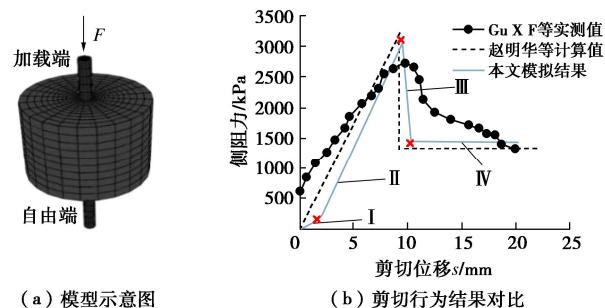


图 2 桩-岩界面剪切行为的验证

Fig. 2 Verification of shear behavior at pile-rock interface

计算结果与文献[4, 10]对比见图 2 (b)。在数值模型中, 界面滑移初始阶段侧阻力上升速率较小, 到达侧阻力峰值对应临界位移比理论结果滞后约 0.3 mm, 剪应力峰值为 3084 kPa, 比理论结果低 4%。随后侧阻力在极小位移内下降至残余剪切强度, 约比理论计算值高 8%, 这是由桩身受荷径向膨胀产生的法向应力增量引起的。总体而言, 基于内聚力接触模型模拟的桩-岩界面剪切特性与实测结果规律一致, 将该模型应用于嵌岩桩承载特性分析所得到的结果具备可靠性。

## 2 嵌岩双斜柱水平承载特性模型试验

### 2.1 试验布置

为研究不同倾角嵌岩双斜柱水平承载特性开展了一系列嵌岩群桩竖向及水平承载模型试验, 试验详情已发表<sup>[11]</sup>。

### 2.2 试验方案

考虑不同设计倾角  $\beta$  (本研究中取  $0^\circ$ ,  $5^\circ$  和  $15^\circ$ ) 和不同竖向定载条件下 (取竖向定载  $V$  为 0 和 0.4 倍竖向极限荷载  $V_{ult}$ ) 时承受水平荷载  $H$  的工况, 设计试验方案见表 1。

表 1 试验方案设计

Table 1 Test scheme design

序号	$\beta /(^{\circ})$	荷载工况	$EI/(N\cdot m)$	桩长/m
G1	0	$H$	1661.6	0.9
G2		$0.4V_{ult}+H$		
G3	5	$H$	1627.7	0.903
G4		$0.4V_{ult}+H$		
G5	15	$H$	1533.8	0.932
G6		$0.4V_{ult}+H$		

### 3 嵌岩双斜桩承载特性有限元模拟

#### 3.1 模型建立

针对 2.1 节模型试验, 采用有限元软件 abaqus, 建立对应数值计算模型如图 3 所示, 模型尺寸足以消除边界效应影响。桩体尺寸, 桩、岩、土材料参数与模型试验完全一致, 见表 2。其中, 桩为完全弹性材料, 通过三点弯曲试验结果取试验桩抗弯刚度  $EI=1533 N\cdot m$ , 以此计算得到桩身材料参数; 上覆砂层为 Mohr-Coulomb 材料; 基岩为 Drucker-Prager 材料。其中相关参数有 Drucker-Prager 的内摩擦角  $\beta$ 、流应力比  $\kappa$  和单轴受压屈服应力  $\sigma_c$  由下式计算<sup>[12]</sup>

$$\tan \beta = \frac{6 \sin \varphi}{3 - \sin \varphi}, \quad (8)$$

$$\kappa = \frac{3 - \sin \varphi}{3 + \sin \varphi}, \quad (9)$$

$$\sigma_c = 2c \frac{\cos \varphi}{1 - \sin \varphi}. \quad (10)$$

式中:  $\varphi$  为 Mohr-Coulomb 材料的内摩擦角;  $c$  为材料黏聚力。 $\kappa$  取值在 0.778~1, 当内摩擦角大于 22° 时, 取极限值 0.778。

表 2 模型材料的力学性质

Table 2 Mechanical properties of materials in model

材料	材料参数				
	$\rho/(kg\cdot m^{-3})$	$E/MPa$	$\mu$	$\varphi/(^{\circ})$	$c/kPa$
桩	2700	38500	0.22	—	—
桩帽	7800	200000	0.30	—	—
砂	1850	100	0.30	25.0	10
岩石	2200	2000	0.22	42.5	400

采用八节点六面体线性缩减积分单元 (C3D8R) 对整个模型进行建模, 参考模型试验建立的有限元模型如图 3 所示。为了提高计算精度, 在桩径 3 倍以内的桩周区域对网格进行了细化。

#### 3.2 试验结果分析

嵌岩双斜桩受水平荷载时桩顶水平偏移与对应荷载间的关系如图 4 所示, 试验中双桩系统的水平承载能力随桩倾角增加而增强, 其中倾角 15° 的双斜桩在某次加载结束后失稳, 对应水平极限荷载为 5.62 kN, 相较于 0° 桩, 5° 和 15° 斜桩的水平极限承载力分别提高了 122.7% 和 244.7%。在竖向荷载下承受水平荷

载, 双直桩桩帽向桩前侧倾覆, 双斜桩则相反。

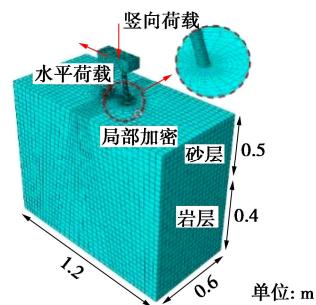


图 3 计算模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of calculation model

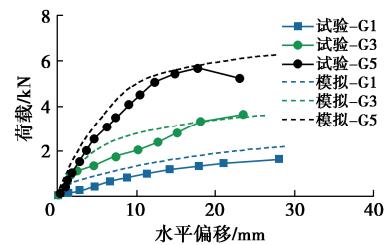


图 4 试验与模拟的水平偏移-荷载曲线

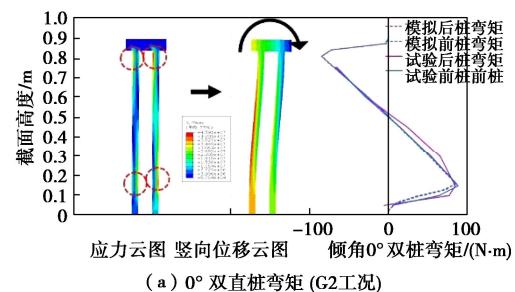
Fig. 4 Horizontal offset-load curves of tests and simulations

图 5 为不同倾角双桩在受 0.4 倍自身极限竖向荷载时分别受 1.6, 3.8, 4.5 kN 水平荷载下的弯矩分布图。其中桩身各截面弯矩  $M_i$  可通过下式计算:

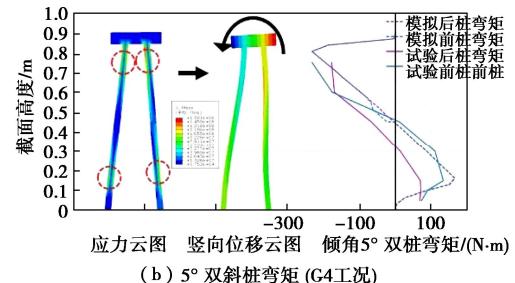
$$M_i = \frac{EI \Delta \varepsilon_i}{d}. \quad (11)$$

式中:  $M_i$  为桩身第  $i$  截面处弯矩;  $I$  为截面惯性矩;  $\Delta \varepsilon_i$  为桩身第  $i$  截面处应变片沿弯曲方向的拉压应变差;  $d$  为桩身截面内径。

定义沿水平力方向前侧桩为前桩, 桩身前侧受压弯矩为正, 受拉弯矩为负。显然, 桩帽下方存在一弯矩极值点, 桩身下部弯矩极值出现于砂-岩接触面。



(a) 0° 双直桩弯矩 (G2工况)



(b) 5° 双斜桩弯矩 (G4工况)

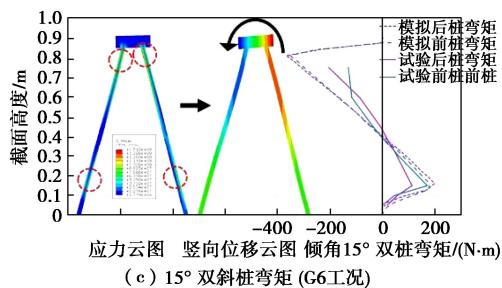


图 5 试验与模拟在 G2、G4 和 G6 工况下桩身弯矩对比

Fig. 5 Comparison of bending moments of piles between test and simulation under G2, G4 and G6 working conditions

### 3.3 试验与模拟结果对比

图 4 表示了不同倾角双桩受水平荷载时的水平位移-荷载的模拟与试验结果对比。当水平位移为 17.75 mm 时, 倾角 0°, 5° 和 15° 双桩所受水平荷载分别为 1.31, 3.25, 5.62 kN, 数值模拟中则为 1.79, 3.23, 5.80 kN, 误差分别为 36.6%, 0.06% 和 3.2%。由于群桩效应, 双直桩中较小的桩间距引起桩与桩间相互作用, 产生一定误差, 对倾角 5° 和 15° 双斜桩而言, 误差在容许范围内, 本方法能较好预测桩基受水平荷载下的位移-荷载曲线。

图 5 给出了倾角 0°, 5° 和 15° 双桩弯矩的结果对比图。模拟中固接桩帽下方约 1 倍桩径处出现弯矩极值, 由于测量手段受限, 试验中并未测得, 该处桩前侧受拉后侧受压, 呈现扭转趋势, 引起桩帽前侧抬起后侧下降。后桩位于砂-岩交界面处, 前桩位于砂-岩交界面上约 0.5 倍桩径处, 出现另一弯矩极值点, 在模型试验中浅层砂对桩身抗力有限, 对桩基稳定性起主要作用的是岩层的嵌固作用, 因此该处抵抗来自桩身径向的荷载分量, 产生弯矩极值。

综上, 本文数值计算模型得到的嵌岩双斜桩承载力、桩身荷载位移及弯矩的规律与试验结果吻合较好, 本文计算模型具有可靠性。

### 3.4 试验与模拟结果对比

基于前文计算模型, 建立足尺嵌岩双斜桩的计算模型, 分析实际工程尺度下的双桩系统受荷响应规律。在模型试验中上层砂土抗力的影响几乎为 0, 故上文所用模型尺寸除上覆盖层厚度设为 9 m, 其他尺寸均放大 30 倍, 分析不同倾斜角度的原型嵌岩双斜桩在受水平荷载下的承载特性。

参考《混凝土结构设计规范: GB50010—2010》<sup>[13]</sup>, 取混凝土桩密度  $\rho$  为  $2400 \text{ kg/m}^3$ 、弹性模量  $E$  为  $31.5 \text{ GPa}$ 、泊松比  $\mu$  为 0.2 和等效屈服应力为  $15.3 \text{ MPa}$ , 对应地质条件材料取值见表 3。其中, 粉质黏土与白云质灰岩的泊松比  $\mu$  分别取 0.35 和 0.3, 弹性模量  $E$

基于线弹性假定, 通过压缩模量  $E_s$ , 由以下公式取值:

$$E = \left(1 - \frac{2\mu^2}{1-\mu}\right) E_s \quad (12)$$

表 3 岩土层力学参数<sup>[8]</sup>

Table 3 Mechanical parameters of rock and soil layers

地层	$\rho /(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$E_s/\text{MPa}$	$c/\text{kPa}$	$\phi/(^\circ)$
粉质黏土	1.95	7.0	25	20
白云质灰岩	2.30	280	60	40

根据美国标准 IBC-2009<sup>[14]</sup>, 将桩水平位移达 25 mm 时对应水平荷载的一半作为单桩水平极限承载, 给出嵌岩双桩的水平极限承载力见图 6。不同受荷状况对不同角度双斜桩的影响也不同, 在研究的角度范围内, 双斜桩的水平极限承载力是随角度增长而增长的, 相较于双直桩, 5° 至 20° 双斜桩的水平承载能力分别提升了 82%, 167%, 240%, 319%, 说明双斜桩抵抗水平荷载的能力显著高于双直桩。

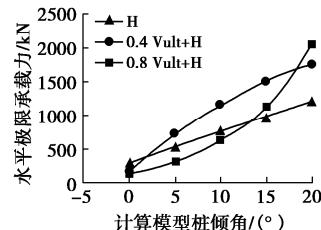


图 6 双桩的水平极限承载力

Fig. 6 Horizontal ultimate bearing capacities of double piles

对双直桩, 在施加 0.4 倍竖向极限荷载后, 其水平极限承载力反而下降了 46%, 这是由于直桩抵抗水平荷载的能力较弱, 施加竖向荷载后引起桩承台下方应力集中, 降低了桩承台的抗倾覆能力, 在更低的水平荷载下达到了水平位移限值。

对双斜桩, 低水平的竖向荷载值 (0.4 倍竖向极限荷载) 提高了斜桩的水平承载能力, 对比仅承受水平荷载, 随倾斜角增加, 5° 至 20° 双斜桩的水平极限承载力分别提高了 38.1%, 50.6%, 53.4%, 46.0%。但在更高的竖向荷载值 (0.8 倍竖向极限荷载值) 下, 0° 至 10° 倾角范围内双桩水平极限承载力降低, 在 15° 桩倾角模拟中比仅受竖向荷载要高 14.6%, 而在 20° 桩倾角情况下甚至超过了受 0.4 倍极限竖向荷载时的水平极限承载力, 增幅达 70.6%。说明双斜桩系统的极限承载性能由多因素协同发挥, 高水平的竖向荷载对受水平荷载的小角度斜桩而言, 虽提高了其倾覆的风险, 但在合适地质条件和桩倾角情况下, 桩基水平承载性能的提升可能更大。总之, 根据不同的现场工况, 应存在一最优桩身倾角和最优竖向荷载设计值使得桩基的水平承载力得到最大提升。

图 7 为倾角为  $15^\circ$  的双斜桩在仅受竖向极限荷载  $V_{ult}$ , 仅受水平极限荷载  $H_{ult}$ , 受 0.4 倍和 0.8 倍  $V_{ult}$  的同时承受水平极限荷载  $H_{ult0.4}$  和  $H_{ult0.8}$  时的弯矩分布图。可知, 双斜桩受水平荷载时, 后桩承受的正弯矩极值比前桩小约 3%, 当承受 0.4 倍和 0.8 倍  $V_{ult}$  时, 前后桩正弯矩极值的差异分别达到了 25.7% 和 53.2%, 说明竖向荷载可以改善前桩弯矩分布, 提高前桩的稳定性, 且该效用随竖向荷载的增大愈加明显。

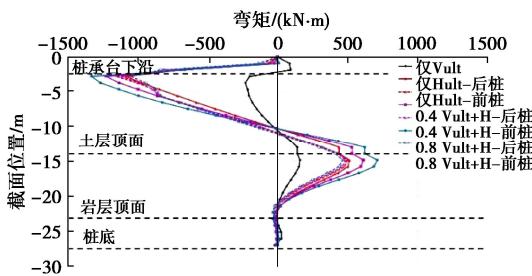


图 7 各工况下双斜桩弯矩分布图

Fig. 7 Distribution of bending moment of double-inclined piles under different working conditions

双斜桩弯矩整体规律与试验类似, 承台以下 1 m 处有一负弯矩极值, 竖向荷载的存在同样能改善该处弯矩分布。在土层下约 1 m 处, 双桩出现正弯矩极值, 在试验中该弯矩极值出现在砂-岩界面处, 说明在足尺模型中上覆盖层土抗力在桩基抗倾覆中起到主要作用。

## 4 结 论

本文通过模型试验研究了嵌岩双柱承载特性, 引入基于内聚力模型的接触本构并验证其可靠性, 建立了与模型试验角度对应的嵌岩双柱数值计算模型, 并与试验结果对比论证。基于上述研究, 建立了  $0^\circ \sim 20^\circ$  角度双柱的足尺模型, 分析了不同受荷工况下的桩基极限承载力及弯矩, 主要得到以下 3 点结论。

(1) 建立适用于描述嵌岩桩桩-岩表面接触特性的内聚力模型参数计算方法并与已有研究对比验证, 其规律吻合, 结果误差较小。

(2) 对低竖向荷载水平, 双直桩的抗水平荷载能力降低, 而双斜桩的抗水平荷载能力则随角度增加逐步提高; 对高竖向荷载水平,  $0^\circ \sim 10^\circ$  双柱承台倾覆失稳风险提高,  $15^\circ \sim 20^\circ$  双柱水平承载能力提升更大。对不同倾角双斜桩, 存在某个最优竖向设计荷载, 使双斜桩的水平承载能力得到最大提升。

(3) 当存在竖向定荷载时, 受水平荷载的双斜桩前桩弯矩得到改善, 但前桩轴力增大, 其抗压能力对桩基稳定性起控制作用。

## 参考文献:

- [1] 刘兴远, 郑颖人, 林文修. 关于嵌岩桩理论研究的几点认识[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(5): 121-122. (LIU Xingyuan, ZHENG Yingren, LIN Wenxiu, Some understandings on the theoretical research of rock socketed pile[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(5): 121-122. (in Chinese))
- [2] 曹卫平, 陆清元, 樊文甫, 等. 竖向荷载作用下斜桩荷载传递性状试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(11): 3048-3056. (CAO Weiping, LU Qingyuan, FAN Wenfu, et al. Experimental study of load transfer behavior of batter piles under vertical loads[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(11): 3048-3056. (in Chinese))
- [3] JOHNSTON I W, LAM T S K. Constant normal stiffness direct shear testing for socketed pile design in weak rock[J]. Géotechnique, 1987, 37(1): 83-89.
- [4] 赵明华, 夏润炎, 尹平保, 等. 考虑软岩剪胀效应的嵌岩桩荷载传递机理分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(6): 1005-1011. (ZHAO Minghua, XIA Runyan, YIN Pingbao, et al. Load transfer mechanism of socketed piles considering shear dilation effects of soft rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(6): 1005-1011. (in Chinese))
- [5] ZHAO H, ZHOU S, ZHAO M H. Load transfer in drilled piles for concrete-rock interface with similar triangular asperities[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2019, 120: 58-67.
- [6] 郑刚, 王丽. 竖向荷载作用下倾斜桩的荷载传递性状及承载力研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(3): 323-330. (ZHENG Gang, WANG Li. Load transfer and bearing capacity of inclined pile under vertical load[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(3): 323-330. (in Chinese))
- [7] SAKELLARIADIS L, ANASTASOPOULOS I. On the mechanisms governing the response of pile groups under combined VHM loading[J]. Géotechnique, 2022, 25(10): 1-22.
- [8] 赵明华, 杨超伟, 陈耀浩, 等. 高陡横坡段桩柱式桥梁双桩基础现场试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(2): 329-335. (ZHAO Minghua, YANG Chaowei, CHEN Yaohao, et al. Field tests on double-pile foundation of bridges in high-steep cross slopes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(2): 329-335. (in Chinese))

- [9] 徐 江. 软岩嵌岩桩桩-岩界面力学行为及损伤演化过程研究[D]. 南京: 东南大学, 2020. (XU Jiang. Study on Mechanical Behavior and Damage Evolution Process of Pile-Rock Interface of Rock-Socketed Piles in Soft Rock[D]. Nanjing: Southeast University, 2020. (in Chinese))
- [10] GU X F, SEIDEL J P, HARBERFIELD C M. Wear of sandstone surfaces during direct shear testing of sandstone/concrete joints[C]// Advances in Deep Foundations (GSP 132) Part of Geo-Frontiers Proceedings of the Sessions of the Geo-Frontiers Congress, Austin, 2005: 1-14.
- [11] ZHUANG D, MA L, GUO W, et al. Laboratory study on bearing capacity of batter rock-socketed pile group under combined loads. Marine Georesources & Geotechnology, 2023: 1-14.
- [12] 郑颖人, 高 红. 岩土材料基本力学特性与屈服准则体系[J]. 建筑科学与工程学报, 2007, 24(2): 1-5. (ZHENG Yingren, GAO Hong. Basic mechanics characteristics and yield criterion system of geomaterials[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2007, 24(2): 1-5. (in Chinese))
- [13] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011. (Code for Design of Concrete Structures: GB 50010—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese))
- [14] International Code Council, International Building Code: IBC2009[S]. America: INC, 2009.

(编校: 黄贤沙)