



# 角砾岩地层大直径钢管桩抗拔 承载特性研究

王琼与<sup>1,2</sup>, 胡振华<sup>3</sup>, 娄学谦<sup>1,2</sup>, 余希武<sup>3</sup>, 邹学韬<sup>4</sup>

(1. 中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230; 2. 中交集团交通基础工程环保与安全重点实验室, 广东 广州 510230;  
3. 中交四航局第二工程有限公司, 广东 广州 510230; 4. 华南理工大学土木与交通学院, 广东 广州 510641)

**摘要:** 基于盐田港1根大直径钢管桩的抗拔静载试验结果与有限元法, 对角砾岩地层钢管桩的抗拔承载特性进行研究。结果表明: SZ1<sup>#</sup>试桩的竖向抗拔极限承载力为2 297 kN, 与设计抗拔极限承载力1 700 kN相比, 具有35%的富余量; 全风化角砾岩和强风化角砾岩与钢管桩的摩擦系数分别为0.38和0.60; 桩加载至破坏后, 即使桩顶荷载增大, 入土段的桩身轴力也不会增大, 此时不同荷载作用下入土段的桩身轴力曲线重合在一起; 钢管桩全风化角砾岩和强风化角砾岩的抗拔极限桩侧摩阻力分别为54.29和60.81 kPa; 钢管桩全风化角砾岩和强风化角砾岩的桩侧摩阻力与桩土相对位移的关系近似呈现软化模型和双曲线模型, 中粗砂和残积土则呈现双折线硬化模型。

**关键词:** 角砾岩地层; 大直径钢管桩; 抗拔静载试验; 有限元法; 承载特性

中图分类号: U655.55; TU473

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)05-0205-07

## Tensile bearing characteristics of large diameter steel pipe piles in breccia geology

WANG Qiongyu<sup>1,2</sup>, HU Zhenhua<sup>3</sup>, LOU Xueqian<sup>1,2</sup>, SHE Xiwu<sup>3</sup>, ZOU Xuetao<sup>4</sup>

(1. CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;

2. Key Laboratory of Environment and Safety Technology of Transportation Infrastructure Engineering, CCCC, Guangzhou 510230, China;

3. The Second Engineering Company of CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;

4. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

**Abstract:** On the basis of the results of the tensile static load test of a large diameter steel pipe pile in Yantian Port and the finite element method, the tensile bearing characteristics of the steel pipe piles in the breccia geology are studied. The results show that by the finite element method, the axial tensile ultimate bearing capacity of SZ1<sup>#</sup> test pile is 2,297 kN, which has a surplus of 35% compared with the designed tensile bearing capacity of 1,700 kN. The friction coefficients between fully weathered breccia and strongly weathered breccia and steel pipe piles are 0.38 and 0.60, respectively. After the pile is loaded to failure, even if the pile top load increases, the axial force of the pile shaft in the soil section will not increase. At this time, the axial force curves of the pile shaft in the soil section overlap together under different loads. The tensile-lateral friction resistance of the steel pipe pile in fully weathered breccia and strong weathered breccia are 54.29 and 60.81 kPa, respectively. In fully weathered and strong weathered breccia, the relationship between the side friction resistance of the steel pipe piles and the relative pile-soil displacement of approximately follows a softening model and a hyperbolic model, respectively. While in medium-coarse sand and residual soil, it presents a bilinear hardening model.

**Keywords:** breccia geology; large-diameter steel pipe pile; tensile static load test; finite element method; bearing characteristics

收稿日期: 2025-09-08 录用日期: 2025-10-31

作者简介: 王琼与(1997—), 男, 硕士, 工程师, 从事港口工程质量检测与科研工作。

盐田港作为中国集装箱码头建设的标杆之一，对深圳及粤港澳大湾区经济发展以及贸易货物出口有着重要作用。盐田港码头采用钢管灌注复合桩作为结构基础，其承载力由上部钢管段(传统钢管桩)与下部出钢管段的灌注段两部分共同组成。该工程钢管桩的持力层大部分为角砾岩，少部分为花岗岩，其中角砾岩属于软岩，较为少见。对于角砾岩地层的灌注桩，龚成中等<sup>[11]</sup>和刘国强等<sup>[12]</sup>利用自平衡方法对其承载特性进行研究，但目前有关角砾岩地层钢管桩的抗拔承载特性的研究较少。对于基桩承载力检测，静载试验<sup>[3-8]</sup>是最可靠的方法。然而，由于静载试验准备周期长、成本较高，尤其在海上无法大面积开展。此外，受限于设备加载能力(反力梁、千斤顶等)，通常很难得到受检桩的极限承载力。此时，利用有限元方法，结合静载试验结果，反演得到桩侧及桩端的岩土参数，可以模拟计算得到该桩的极限承载力<sup>[9-13]</sup>。

本文基于盐田港的 1 根大直径钢管桩的竖向抗拔静载试验结果与有限元方法，对角砾岩地层大直径钢管桩的抗拔承载特性进行研究，给出该桩的竖向抗拔极限承载力、不同岩层与钢管桩的摩擦系数以及桩侧摩擦阻力的取值，并对桩土阻力发挥机理进行探讨。研究成果可为类似地质的工程提供参考。

### 1 工程与地质概况

盐田港东港一期工程集装箱码头共建设 3 个泊位，每个泊位为 20 万吨级。码头岸线长 1 470 m。码头结构基础为钢管灌注复合桩，共 1 888 根，其

中钢管段的持力层主要为强风化角砾岩。码头沿线方向，桩中心间距为 6.4 m；垂直于码头沿线方向，桩中心间距为 6 m，即最小桩间距为 6 m (大于 3 倍桩径，桩径  $D=1.4\text{ m}$ )，故桩在轴向承载力计算时可不考虑群桩效应。陆侧和海侧的桩径为 1 400 mm，属于大直径桩，分直桩和斜桩两种，其中斜桩的斜率为 6:1。本文以直桩 SZ1# 钢管桩为例，对角砾岩地层大直径钢管桩的抗拔承载特性进行研究。试桩参数见表 1，附近地层分布见图 1。土层物理力学性质和桩基设计参数推荐值分别见表 2 和 3。

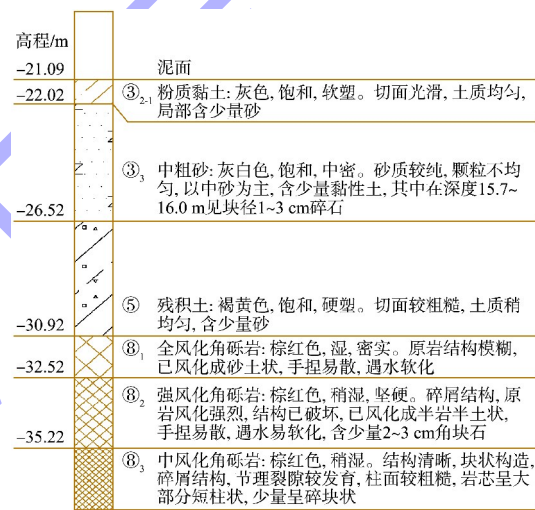


图 1 试桩土层分布

Fig. 1 Distribution of soil layers

表 1 试桩参数

Tab. 1 Parameters of test piles

桩号	桩径/ mm	壁厚/ mm	泥面 高程/m	桩顶 高程/m	桩底 高程/m
SZ1	1 400	20	-21.09	6.83	-35.22

表 2 土层物理力学性质指标

Tab. 2 Physical and mechanical properties of soil layers

土层编号与名称	弹性模量/MPa	天然重力密度/( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	内摩擦角/( $^\circ$ )	黏聚力/kPa	标准贯入击数/击
③ <sub>2,1</sub> 粉质黏土	3.4	17.7	11.3	15.1	5
③ <sub>3</sub> 中粗砂	7.9	20.5	-	-	29
⑤ 残积土	6.6	19.6	13.3	39.8	19
⑧ <sub>1</sub> 全风化角砾岩	-	-	-	-	27~49
⑧ <sub>2</sub> 强风化角砾岩	-	-	-	-	>50

表 3 桩基设计参数推荐值

Tab. 3 Recommended values for pile design parameters

土层编号 与名称	预制桩抗压极限标准值/kPa	
	侧摩阻力	端阻力
③ <sub>2-1</sub> 粉质黏土	35~45	-
③ <sub>3</sub> 中粗砂	80	-
⑤ 残积土	70	-
⑧ <sub>1</sub> 全风化角砾岩	80	-
⑧ <sub>2</sub> 强风化角砾岩	160	7 000~9 000

## 2 试验结果与分析

利用试桩相邻的 4 根工程桩作为反力桩, 搭设反力系统, 见图 2。



图 2 试验现场  
Fig. 2 Test site

本文竖向抗拔静载试验依据项目技术规格书执行, 分两次循环加载, 第 1 循环和第 2 循环的最大加载值分别为 1 133.33 和 1 700.00 kN。SZ1<sup>#</sup>试桩的荷载-上拔量( $Q-\delta$ )曲线见图 3, 其试验结果见表 4。

由图 3 和表 4 可知: 1) SZ1<sup>#</sup>试桩在第 1 循环最大加载值 1 133.33 kN 作用下的桩顶上拔量为 3.43 mm, 全部卸载后的残余位移为 1.24 mm, 在第 2 循环最大加载值 1 700 kN 作用下的桩顶上拔量 5.95 mm, 全部卸载后的残余位移为 2.52 mm, 满足设计要求 (即最大试验荷载时桩顶上拔量不超过 15 mm, 且全部卸载后的残余位移分别不超过 8 mm)。2) 试桩  $Q-\delta$  曲线呈缓变型, 且最大桩顶上拔量 5.95 mm 仅占技术规格书限定最大上拔量 15 mm 的 40%, 说明该桩的设计比较保守, 实际的抗拔极限承载力大于设计要求的 1 700 kN; 3) 在第 2 循环加载过程中, 当荷载小于 1 275 kN

之前,  $Q-\delta$  曲线接近线性关系, 说明桩土模型在荷载 1 275 kN 之前基本处于线弹性变形阶段。4) 对于第 1 和第 2 循环, 卸载阶段均基本属于弹性卸载。

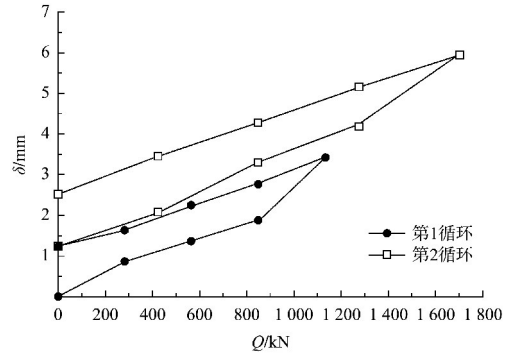


图 3 SZ1<sup>#</sup>试桩  $Q-\delta$  曲线  
Fig. 3  $Q-\delta$  curves of SZ1<sup>#</sup> test pile

表 4 试验结果

Tab. 4 Test results

加载过程	桩顶荷载/kN	桩顶上拔量/mm	桩顶残余位移/mm	桩顶回弹率/%
第 1 循环	1 133.33	3.43	1.24	63.8
第 2 循环	1 700.00	5.95	2.52	57.6

## 3 极限承载力模拟与抗拔承载特性分析

### 3.1 抗拔极限承载力模拟计算

由于 SZ1<sup>#</sup>试桩的竖向抗拔静载试验没有做到破坏, 得不到该桩真实的极限抗拔承载力。为了获得该桩的抗拔极限承载力, 本文采用有限元方法进行计算, 并将其结果进行对比。对于钢管桩的竖向抗拔静载试验, 破坏模式通常有缓变型和陡升型两种。

#### 3.1.1 材料模型及参数

钢管桩采用线弹性本构模型进行模拟, 其中弹性模量  $E=210$  GPa, 泊松比  $\nu=0.3$ ; 岩土采用的材料模型为 Mohr-Coulomb 模型<sup>[14-16]</sup>。由于地勘资料未给出角砾岩等参数, 而只给出部分土参数, 见表 2。为了获得这些岩土参数, 本文基于表 2 中的部分土参数与试验结果, 经多次试算发现, 当各土层的计算参数按表 5 取值时, 模拟结果与试验结果最为吻合。

表 5 岩土计算参数  
Tab. 5 Calculation parameters of soil layers

土层编号与名称	弹性模量/MPa	重力密度/(kN·m <sup>-3</sup> )	内摩擦角/(°)	剪胀角/(°)	黏聚力/kPa	桩土摩擦系数
③ <sub>2-1</sub> 粉质黏土	3.4	17.7	11.3	5.65	15.1	0.27
③ <sub>3</sub> 中粗砂	7.9	20.5	30.0	15.00	0.5	0.58
⑤ 残积土	6.6	19.6	13.3	6.65	39.8	0.24
⑧ <sub>1</sub> 全风化角砾岩	100.0	21.0	21.0	6.00	30.0	0.38
⑧ <sub>2</sub> 强风化角砾岩	1 000.0	22.0	24.0	10.00	50.0	0.60

### 3.1.2 有限元模型

为了提高计算效率,本文计算只建立 1/4 桩土有限元模型,施加对称边界条件,然后在桩顶施加位移(为了便于计算收敛,使用位移荷载代替集中力加载),再通过拾取桩顶各单元的应力,计算这些应力的平均值,最后乘以整个桩顶截面积得到相应的桩顶荷载,从而得到和静载试验相对应的荷载-位移曲线。为了验证 1/4 的桩土有限元模型能代替整个桩土模型的有效性,利用一根钢管桩进行验算,该模型的桩径 1.4 m、壁厚 24 mm、桩长 5 m,桩底设置固定边界条件,桩顶施加 10 mm 的向上位移。1/4 模型和全模型的计算结果云图见图 4。由计算结果并通过桩顶应力和桩顶截面积可知,当桩顶位移 10 mm 时,1/4 模型和全模型的桩顶荷载分别为 43 716.82 和 43 717.86 kN,两者几乎一致,说明 1/4 的桩土有限元模型在对称边界条件下,能有效替代全模型,这也是不少学者在模拟桩土计算时采用的一种手段<sup>[17-18]</sup>。

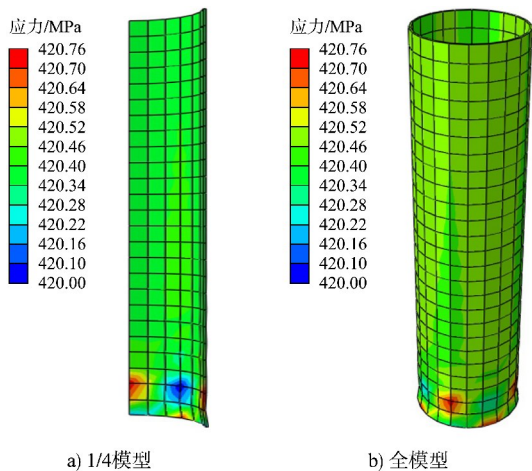


图 4 验算结果云图

Fig. 4 Cloud map of verification results

对于本文静载试验有限元模拟,为了消除边界效应的影响,地基模型的直径取桩径的 20 倍,因此本文计算的桩土有限元模型见图 5。



图 5 桩土有限元模型

Fig. 5 Pile-soil finite element model

### 3.1.3 边界条件与荷载施加

桩土模型底部设置固定边界条件。在 1/4 模型两边界面处均设置对称边界条件。土体四周环向固定,但上下位移自由,即  $x$  向位移  $U_x$  和  $y$  向位移  $U_y$  为 0,  $z$  向位移  $U_z$  自由。为了得到极限承载力和计算更加容易收敛,本文计算的桩顶荷载采用位移荷载,即在桩顶施加 20 mm 的向上位移。此外,桩土之间设置接触,经多次计算发现,桩土摩擦系数按表 5 取值时,模拟结果与试验结果最为吻合。

### 3.1.4 数值模拟结果与试验结果对比

计算时先进行地应力场平衡,再按位移荷载 20 mm 进行计算。计算结果云图见图 6。桩顶荷载-上拔量关系曲线的数值结果和试验结果对比见图 7。

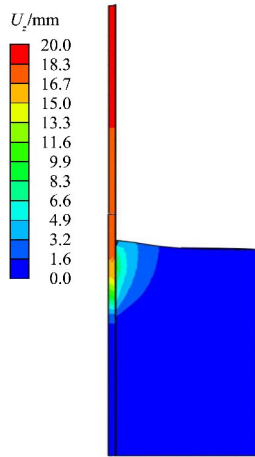


图 6 数值模拟结果云图

Fig. 6 Cloud map of numerical simulation results

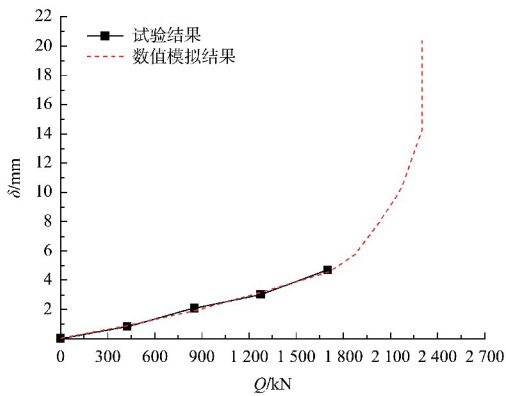


图 7 试验结果和数值模拟结果对比

Fig. 7 Comparison of test and numerical results

由表 5 和图 7 可知: 1) 有限元方法能很好地反映出 SZ1# 试桩竖向抗拔过程中的荷载-位移关系, 且数值模拟结果和试验结果非常吻合。在最大试验荷载 1 700 kN 时, 试验得到的桩顶上拔量为 4.71 mm (即第 2 循环桩顶最大上拔量减去第 1 循环桩顶残余位移), 数值模拟得到的桩顶上拔量为 4.48 mm, 两者非常接近; 2) 数值模拟结果中, 在荷载 1 869 kN 之前, 荷载-位移曲线基本呈现线性弹性关系; 荷载在 1 869~2 297 kN, 荷载-位移曲线处于塑性变形阶段, 桩顶上拔速率逐渐明显; 当加载至 2 297 kN 后, 虽然荷载增加很少, 但桩顶上拔量急剧增加, 属于陡升型破坏模式, 即 SZ1# 试桩的竖向抗拔极限承载力为 2 297 kN (此时桩顶上拔量为 14.28 mm), 与设计要求的抗拔极限承载力 1 700 kN 相比, 具有 35% 的富余量。3) 全风

化角砾岩和强风化角砾岩与钢管桩的摩擦系数分别为 0.38 和 0.60; 全风化角砾岩的内摩擦角、弹性模量、重力密度、剪胀角、黏聚力分别为 21°、100 MPa、21 kN/m<sup>3</sup>、6°、30 kPa, 强风化角砾岩的内摩擦角、弹性模量、剪胀角、黏聚力分别为 24°、1 000 MPa、22 kN/m<sup>3</sup>、10°、50 kPa, 这些岩土参数可对类似地质工程的桩基设计提供参考。

### 3.2 抗拔承载特性分析

为了进一步研究角砾岩地层大直径钢管桩的抗拔承载特性, 基于有限元法, 得到 SZ1# 试桩的在不同分级荷载下的桩身轴力图以及不同类别土层的桩土相对位移与抗拔侧摩阻力的关系, 见图 8 和 9。

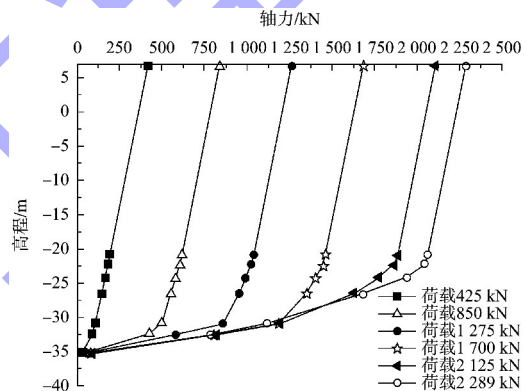


图 8 桩身轴力

Fig. 8 Axial force of pile shaft

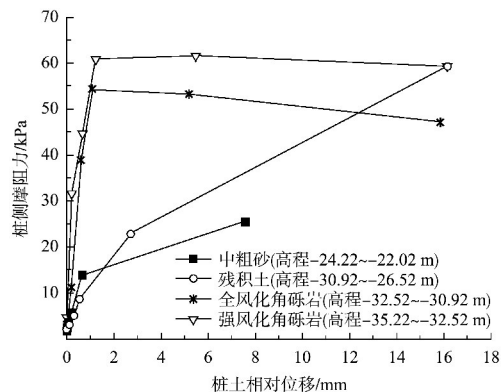


图 9 桩土相对位移-桩侧摩阻力关系曲线

Fig. 9 Curves of pile-soil relative displacement and side friction

由图 8 可知: 1) 桩身轴力从桩顶至桩底逐渐减小, 且在强风化角砾岩时衰减更快, 这说明强风化角砾岩的侧摩阻力相比其他岩土层更

大; 2) 加载至桩破坏后(即达到极限承载力), 即使桩顶荷载增大, 入土段的桩身轴力也不会增大, 这是因为桩土之间的侧摩阻力已达到极限值, 桩土阻力与桩顶上拔力无法平衡, 桩被拔出。

由图9可知: 1) 全风化角砾岩和强风化角砾岩的桩侧摩阻力与桩土相对位移近似呈现软化模型和双曲线模型, 中粗砂和残积土则呈现双折线硬化模型。2) 全风化角砾岩在桩土相对位移 1.1 mm 时, 抗拔侧摩阻力达到最大值 54.29 kPa, 随后随着桩土相对位移的增大, 抗拔侧摩阻力呈现减小弱化的现象。3) 强风化角砾岩在桩土相对位移 1.23 mm 时, 抗拔侧摩阻力达到最大值 60.81 kPa; 中粗砂和残积土的抗拔极限侧摩阻力分别为 25.48 和 59.35 kPa。

#### 4 结论

1) 基于有限元法, SZ1#试桩的抗压极限承载力 2 297 kN, 与设计极限承载力 1 700 kN 相比, 具有 35% 的富余量。

2) 基于试验结果和有限元方法, 反演得到的全风化角砾岩和强风化角砾岩与钢管桩的摩擦系数分别为 0.38 和 0.60。

3) SZ1#试桩加载至破坏后, 即使桩顶荷载增大, 入土段的桩身轴力也不会增大, 此时不同荷载作用下入土段的桩身轴力曲线重合在一起。

4) 全风化角砾岩地层钢管桩在桩土相对位移 1.1 mm 时, 抗拔侧摩阻力达到最大值 54.29 kPa, 随后随着桩土相对位移的增大, 抗拔侧摩阻力呈现减小的现象。强风化角砾岩地层钢管桩在桩土相对位移 1.23 mm 时, 抗拔侧摩阻力达到最大值 60.81 kPa。中粗砂和残积土地层钢管桩的抗拔极限侧摩阻力分别为 25.48 和 59.35 kPa。

#### 参考文献:

[1] 龚成中, 何春林, 龚维明. 深嵌岩桩承载特性及其荷载传递法应用[J]. 土木建筑与环境工程, 2013, 35(4): 84-88.  
GONG C Z, HE C L, GONG W M. Bearing characteristics

of deep rock-socketed piles and application of load transfer method [J]. Journal of civil, architectural & environmental engineering, 2013, 35(4): 84-88.

- [2] 刘国强, 王亚堃, 胡德功, 等. 青岛海湾大桥大直径深嵌岩桩承载特性试验分析[J]. 路基工程, 2011(6): 73-76, 79.  
LIU G Q, WANG Y K, HU D G, et al. Experimental analysis of bearing characteristics of large-diameter deep rock-socketed pile in Qingdao Gulf Bridge[J]. Subgrade engineering, 2011(6): 73-76, 79.
- [3] 苏世定, 陈章宇, 桑登峰. 千枚岩上覆钙质砂层大直径钢管桩沉降特性分析[J]. 水运工程, 2021(2): 150-154, 165.  
SU S D, CHEN Z Y, SANG D F. Settlement characteristic of large-diameter steel pipe pile in weathered phyllite overlying calcareous sand[J]. Port & waterway engineering, 2021(2): 150-154, 165.
- [4] 吴浩, 胡兴昊, 赵刘群, 等. 海上密实碎石土持力层钢管桩沉桩及承载特性试验研究[J]. 水运工程, 2023(7): 212-217.  
WU H, HU X H, ZHAO L Q, et al. Experiment on pile sinking and bearing characteristics of steel pipe piles in dense gravel soil bearing stratum at sea [J]. Port & waterway engineering, 2023(7): 212-217.
- [5] 娄学谦, 王幸, 吕述晖, 等. 软岩地层灌注桩抗压与抗拔承载性分析[J]. 水运工程, 2018(5): 165-170, 182.  
LOU X Q, WANG X, LYU S H, et al. Analysis on uplift and compression resistance of cast-in-situ piles in soft rock area [J]. Port & waterway engineering, 2018(5): 165-170, 182.
- [6] 冯光华, 林治平. 深厚软土地基钢管桩静载试验研究[J]. 水运工程, 2017(10): 206-210.  
FENG G H, LIN Z P. Static load experimental study on steel tube piles in deep soft soil foundation [J]. Port & waterway engineering, 2017(10): 206-210.
- [7] 戈浩波, 龙俞辰, 邓涛. 后注浆技术在港口工程中的应用及桩基承载力研究 [J]. 水运工程, 2024(8): 270-275.  
GE H B, LONG Y C, DENG T. Application of post-grouting in port project and research on bearing capacity

- of pile foundation [J]. *Port & waterway engineering*, 2024(8): 270-275.
- [8] 王景灯. 大直径后注浆灌注桩在极软岩地质条件码头中的应用[J]. *水运工程*, 2024(11): 195-201.  
WANG J D. Application of post-grouting pile with large diameter in wharfs with extremely soft rock geological condition[J]. *Port & waterway engineering*, 2024(11): 195-201.
- [9] 文磊, 刘钟, 马晓华, 等. 粉土地基中劲性复合桩抗压承载特性与荷载传递机制研究[J]. *岩土力学*, 2024, 45(2): 511-524.  
WEN L, LIU Z, MA X H, et al. Compressive bearing capacity and load transfer mechanism of stiffened deep cement mixing pile installed in silt[J]. *Rock and soil mechanics*, 2024, 45(2): 511-524.
- [10] 朱云祥, 陈哲, 方瑜, 等. 灌注桩竖向承载力静载试验与有限元模拟[J]. *结构工程师*, 2021, 37(4): 152-159.  
ZHU Y X, CHEN Z, FANG Y, et al. Static load test and finite element simulation of vertical bearing capacity of bored piles[J]. *Structural engineers*, 2021, 37(4): 152-159.
- [11] 蒋建平, 孙宏涛, 高嘉若. V-H 荷载作用下海洋平台吸力式桩桶桩土承载特性研究[J]. *海洋工程*, 2023, 41(6): 1-10.  
JIANG J P, SUN H T, GAO J R. Study on bearing characteristics of suction pile and soil of offshore platform under V-H load[J]. *The ocean engineering*, 2023, 41(6): 1-10.
- [12] 黄生根, 梅世龙, 龚维明. 南盘江特大桥岩溶桩基承载特性的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(5): 809-813.  
HUANG S G, MEI S L, GONG W M. Testing study on bearing behavior of piles for Nanpan River great bridge in karst area[J]. *Chinese journal of rock mechanics and engineering*, 2004, 23(5): 809-813.
- [13] 朱克文, 俞剑, 黄茂松. 饱和黏土中抗拔桩上限承载力分析及土塞效应[J]. *岩土力学*, 2023, 44(7): 1995-2004, 2027.  
ZHU K W, YU J, HUANG M S. Upper bound analysis of uplift piles in saturated clay and soil plug effect[J]. *Rock and soil mechanics*, 2023, 44(7): 1995-2004, 2027.
- [14] 崔春义, 黄建, 孙占琦, 等. 不同水位下钢板桩围堰工作性状有限元分析[J]. *广西大学学报(自然科学版)*, 2010, 35(1): 187-192.  
CUI C Y, HUANG J, SUN Z Q, et al. FEM analysis of working performance of a cofferdam system with steel sheet piles under different water heights[J]. *Journal of Guangxi University (natural science edition)*, 2010, 35(1): 187-192.
- [15] 梁冠亭, 邓利明, 肖铭钊, 等. 多溶洞地层桩端极限承载力下限有限元法分析[J]. *长江科学院院报*, 2020, 37(6): 94-99.  
LIANG G T, DENG L M, XIAO M Z, et al. Lower bound limit element analysis on bearing capacity of pile foundation above karst caves [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2020, 37(6): 94-99.
- [16] 乔友刚, 吴先敏. 水平受荷桩非线性有限元分析[J]. *水运工程*, 2009(4): 38-42.  
QIAO Y G, WU X M. Non-linear finite element analysis of laterally loaded pile [J]. *Port & waterway engineering*, 2009(4): 38-42.
- [17] 吴鹏, 龚维明, 梁书亭. 用三维有限元法对超长单桩桩端承载力的研究[J]. *岩土力学*, 2006, 27(10): 1795-1799.  
WU P, GONG W M, LIANG S T. Study of base bearing capacity of overlength single pile using 3D FEM [J]. *Rock and soil mechanics*, 2006, 27(10): 1795-1799.
- [18] 傅少君, 谢作为, 杨红成, 等. CFG 桩复合地基静载试验及有限元模拟[J]. *沈阳工业大学学报*, 2021, 43(6): 698-702.  
FU S J, XIE Z W, YANG H C, et al. Static load tests and finite element simulation of CFG pile composite foundation [J]. *Journal of Shenyang University of Technology*, 2021, 43(6): 698-702.