

· 地基与基础 ·



## 角砾岩地层钢管灌注复合桩承载特性研究\*

胡振华<sup>1</sup>, 王琮与<sup>2,3</sup>, 娄学谦<sup>2,3</sup>, 余希武<sup>1</sup>, 刘岩<sup>1</sup>, 高柳<sup>4</sup>

(1. 中交四航局第二工程有限公司, 广东 广州 510230; 2. 中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230;  
3. 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;  
4. 中国矿业大学 力学与土木工程学院, 江苏 徐州 221116)

**摘要:** 角砾岩具有遇水软化特点, 对灌注桩的承载力影响很大。基于盐田港东一期工程的 2 根钢管灌注复合桩的自平衡静载试验结果, 对角砾岩地层钢管灌注复合桩承载特性进行了研究, 结果表明: 1) 灌注桩段强风化角砾岩和中风化角砾岩的抗压桩侧摩阻力分别不小于 150.06 和 248.67 kPa, 中风化角砾岩的端阻力不小于 2 578.86 kPa; 2) 强风化角砾岩、中风化角砾岩的抗拔折减系数分别约为 0.85 和 0.94; 3) 中风化角砾岩在桩土相对位移大于 0.50 mm 后, 桩侧摩阻力增长速率趋于稳定, 并在桩土相对位移小于 3.68 mm 前桩侧摩阻力仍未充分发挥; 4) 试桩 S1<sup>#</sup>和 S2<sup>#</sup>的单桩竖向抗压极限承载力的理论计算值分别不小于 28 108.58 和 29 768.71 kN, 具有不小于 1.34 和 1.42 的安全系数。相关成果可为类似地质港口码头等工程的桩长设计提供参考。

**关键词:** 角砾岩; 钢管灌注复合桩; 自平衡静载试验; 承载特性; 桩侧摩阻力

中图分类号: U65; TU473

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)12-0223-07

### Bearing characteristics of composite pile of steel pipe pile and cast-in-place pile in breccia geology

HU Zhenhua<sup>1</sup>, WANG Qiongyu<sup>2,3</sup>, LOU Xueqian<sup>2,3</sup>, SHE Xiwu<sup>1</sup>, LIU Yan<sup>1</sup>, GAO Liu<sup>4</sup>

(1. The Second Engineering Company of CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;  
2. CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;  
3. Key Laboratory of Environment and Safety Technology of Transportation Infrastructure Engineering, CCCC, Guangzhou 510230, China;  
4. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** Breccia has the characteristics of softening when exposed to water, which has a great impact on the bearing capacity of cast-in-place piles. Based on the static load test results of self-balanced method of two composite piles of steel pipe pile and cast-in-place pile in Phase I project of Yantian Port East, the bearing characteristics of composite pile of steel pipe pile and cast-in-place pile in breccia geology are studied. The results show that: 1) The compressive shaft friction of cast-in-place pile in the strong weathered breccia and middle weathered breccia are not less than 150.06 and 248.67 kPa, respectively, and the pile-end resistance in middle weathered breccia is not less than 2,578.86 kPa. 2) The pull-out resistance reduction coefficients of the strong weathered breccia and the middle weathered breccia are about 0.85 and 0.94, respectively. 3) After the pile-soil relative displacement in the middle weathered breccia is greater than 0.50 mm, the growth rate of the shaft friction tend to stabilize, and the shaft friction of the pile is not fully activated before the pile-soil relative displacement is less than 3.68 mm. 4) The theoretical calculation values of the vertical compressive ultimate bearing capacity of the test pile S1<sup>#</sup> and S2<sup>#</sup> are not less than 28,108.58 and 29,768.71 kN, with safety coefficients of not less than 1.34 and 1.42, respectively. The relevant results can provide reference for the pile length design of similar geological port terminals and other project.

**Keywords:** breccia; composite pile of steel pipe pile and cast-in-place pile; static load test of self-balanced method; bearing characteristics; shaft friction

收稿日期: 2025-04-15 录用日期: 2025-04-29

\*基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(52108359)

作者简介: 胡振华(1987—), 男, 高级工程师, 从事港口与航道工程项目管理。

深圳盐田港是中国集装箱港口建设的标杆之一，亦是中国进出口贸易重要门户，分中港区、西港区和东港区，其中东港一期工程的建设将进一步优化粤港澳大湾区港口群的布局，更深层次推动深圳及粤港澳大湾区经济和对外贸易发展，增强深圳国际航运综合服务功能。东港一期工程采用钢管灌注复合桩作为码头基础，大部分区域的桩端设计持力层为角砾岩，部分区域为花岗岩。角砾岩属于软岩，具有遇水软化的特点，该特点对于灌注桩的承载力影响很大。目前，有关角砾岩地层灌注桩的侧摩阻力和桩端阻力的研究较少<sup>[1-2]</sup>，并且角砾岩地层在国内比较少见，可参考的项目极少。因此，灌注桩侧摩阻力与桩端阻力的取值是本工程的主要难点之一，对桩长设计有很大影响。

为了获得灌注桩的侧摩阻力与端阻力，通常采用分层侧阻力测试方法，即在桩内指定位置埋设传感器(如钢筋应力计)，在进行静载试验(单桩竖向抗压静载试验、自平衡试验等)时同时开展分层侧阻力测试<sup>[3-11]</sup>。

本文基于盐田港东一期工程的 2 根钢管灌注复

合桩的自平衡静载试验数据，对角砾岩地层灌注桩的承载特性进行研究，并给出全风化角砾岩、强风化角砾岩以及中风化角砾岩地层钢管灌注复合桩侧摩阻力和端阻力的取值，旨在为类似地质的工程提供参考。

1 工程与地质概况

盐田港东一期工程共布置 3 个 20 万吨级集装箱泊位，岸线长度 1 470 m，陆域总面积约为 120 万 m<sup>2</sup>。码头采用钢管灌注复合桩作为结构基础，其中钢管段(永久钢护筒)入强风化岩层一定深度；灌注段根据承载力要求入中风化岩层一定深度，桩身混凝土设计强度等级为 C40。持力层主要为中风化角砾岩、少部分为中风化花岗岩。

本文以 S1<sup>#</sup>试桩和 S2<sup>#</sup>试桩为例，概况见表 1，附近的地层分布见图 1。

表 1 试桩概况

Tab. 1 Information of test piles

桩号	桩径/ mm	泥面 高程/m	桩顶 高程/m	钢管段底 高程/m	灌注段底 高程/m
S1 <sup>#</sup>	1 400	-14.50	3.35	-36.67	-64.00
S2 <sup>#</sup>	1 400	-13.20	3.35	-36.48	-59.00

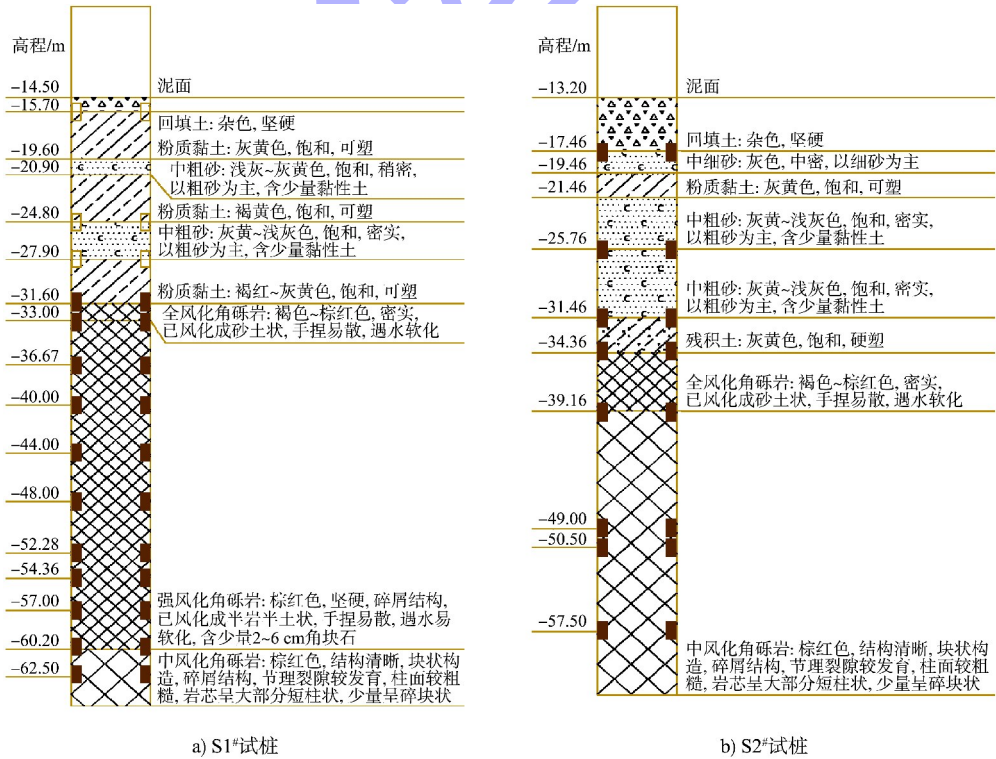


图 1 试桩土层分布及钢筋计埋设位置  
Fig. 1 Distribution of soil layers and position of sensors

## 2 施工工艺与试验方案

### 2.1 施工工艺

盐田港东一期工程的钢管灌注复合桩的施工工艺流程见图 2。当钢管段入强风化角砾岩一定深度后(一般约为 1.5 m)以及贯入度不大于 8 mm/击时,对该桩进行高应变检测,然后开始搭设海上施工平台,最后成孔并浇筑混凝土。

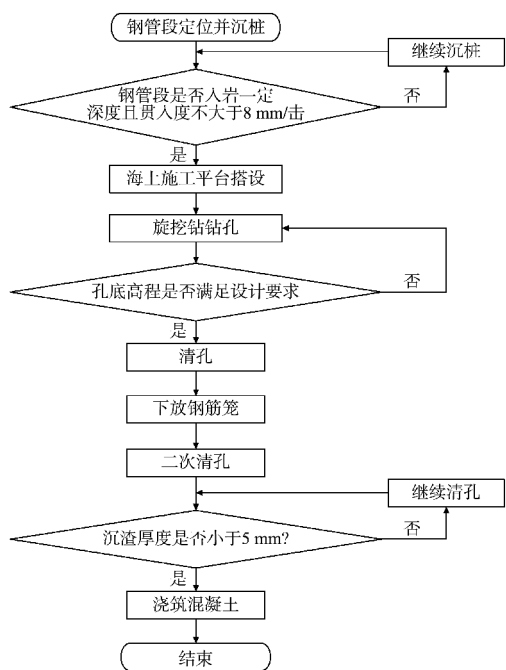


图 2 施工工艺流程

Fig. 2 Construction process flow

### 2.2 试验方案

自平衡静载试验原理为将荷载箱埋入桩的指定位置(即平衡点),使得上段桩桩侧极限阻力和自重力以及下段桩桩侧极限阻力和桩端极限阻力平衡来维持加载。

平衡点由式(1)~(5)确定:

$$Q_{us} = \sum \lambda_i q_{si} u_i l_{i1} + W \quad (1)$$

$$l_1 = \sum l_{i1} \quad (2)$$

$$Q_{ux} = \sum q_{si} u_i l_{i2} + q_{pk} A_p \quad (3)$$

$$l_2 = \sum l_{i2} \quad (4)$$

$$Q_{us} = Q_{ux} \quad (5)$$

式中:  $Q_{us}$  为上段桩抗拔极限承载力, kN;  $Q_{ux}$  为下段桩抗压极限承载力, kN;  $l_1$  为平衡点至泥面的

距离, m;  $l_2$  为平衡点至桩底的距离, m;  $l_{i1}$  为  $l_1$  范围内第  $i$  层土的厚度, m;  $l_{i2}$  为  $l_2$  范围内第  $i$  层土的厚度, m;  $u_i$  为第  $i$  层土对应的桩身周长, m;  $q_{si}$  为第  $i$  层土的抗压极限侧摩阻力标准值, kPa;  $\lambda_i$  为第  $i$  层土抗拔侧摩阻力修正系数, 可根据 JTS 240—2020《水运工程基桩试验检测技术规范》<sup>[12]</sup>取值, 即黏性土与粉土取 0.8, 砂土取 0.7, 岩层取 1;  $W$  为上段桩的自重力, kN;  $q_{pk}$  为极限桩端阻力标准值, kPa;  $A_p$  为桩底面积, m<sup>2</sup>。

试验时单向最大加载值按下式计算:

$$Q_{nu} = \frac{\bar{\lambda} Q + W}{\bar{\lambda} + 1} \quad (6)$$

式中:  $Q_{nu}$  为荷载箱单向试验最大加载值, kN;  $\bar{\lambda}$  为加权抗拔系数;  $Q$  为单桩竖向抗压静载试验的最大试验荷载。

根据地质资料以及式(1)~(6), 可得试桩 S1<sup>#</sup> 和 S2<sup>#</sup> 的平衡点(即荷载箱埋设位置)、 $l_1$ 、 $l_2$  及试验单向最大加载值, 见表 2。

表 2 荷载箱埋设位置及试验单向最大加载值

Tab. 2 Position of load cell and maximum test load

桩号	平衡点高程/m	$l_1$ /m	$l_2$ /m	单向最大加载值/kN
S1 <sup>#</sup>	-53.62	39.12	10.38	10 300
S2 <sup>#</sup>	-49.79	53.14	9.21	10 589

为了得到各土层的桩侧摩阻力和桩端阻力, 在土层分界面以及角砾岩不同深度布设振弦式钢筋应力计(简称钢筋计, 每个测试断面对称布置 2 个)。最底下 1 组钢筋计靠近桩端, 且与桩端的距离不小于 1 倍桩径, 用以测试桩端阻力。

根据 JTS 240—2020《水运工程基桩试验检测技术规范》, 基桩竖向抗压极限承载力按下式确定:

$$Q_u = \frac{Q_{um} - W}{\lambda} + Q_{ud} \quad (7)$$

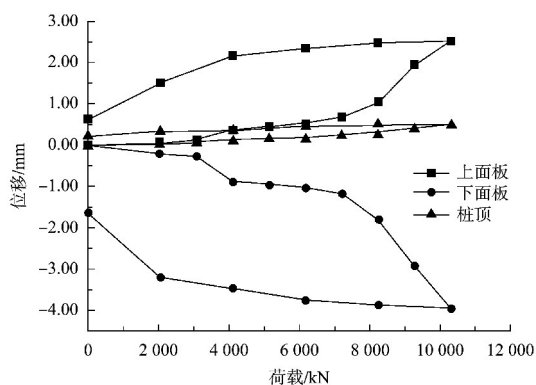
式中:  $Q_u$  为单桩竖向抗压极限承载力, kN;  $Q_{um}$  为上段桩的加载极限值, kN;  $Q_{ud}$  为下段桩的加载极限值, kN。

## 3 试验结果及分析

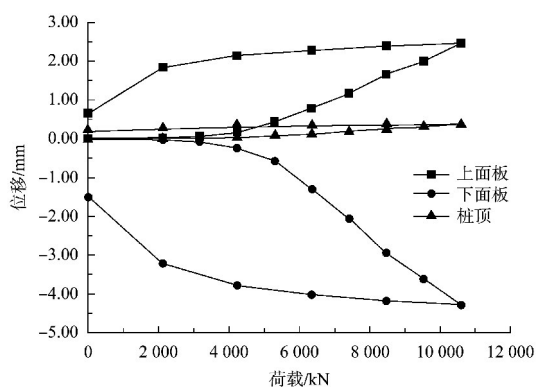
### 3.1 各级荷载下荷载箱上下面板及桩顶位移

S1<sup>#</sup> 和 S2<sup>#</sup> 试桩各级荷载作用下的荷载-位移

( $Q$ - $s$ )曲线见图3。荷载达到单向最大试验荷载时,荷载箱上面板、下面板以及桩顶位移见表3。



a) S1#试桩



b) S2#试桩

图3  $Q$ - $s$  曲线  
Fig. 3  $Q$ - $s$  curves

表3 单向最大试验荷载时荷载箱上下面板与桩顶位移  
Tab. 3 Displacement of upper and lower plates of load cells and pile top under unidirectional maximum test load

桩号	荷载/kN	位移/mm		
		上面板	下面板	桩顶
S1#	10 300	2.52	-3.95	0.50
S2#	10 589	2.46	-4.29	0.37

由图3以及表3可知,S1#和S2#试桩的 $Q$ - $s$ 曲线均呈缓变型。S1#试桩单向最大试验荷载10 300 kN时上面板、下面板与桩顶的位移分别为2.52、3.95与0.50 mm;卸载为0 kN时上面板、下面板与桩顶的位移残余量分别为0.61、1.64与0.21 mm。S2#试桩单向最大试验荷载10 589 kN时上面板、下面板与桩顶的位移分别为2.46、4.29与0.37 mm;卸载为0 kN时上面板、下面板与桩顶的位移残余量分别为0.66、1.50与0.18 mm。这2根桩最大试验荷载时上、下面板位移均小于40 mm,上段

桩和下段桩的极限承载力均不小于最大试验荷载。根据式(7),S1#和S2#试桩的竖向抗压极限承载力均不小于21 000 kN。

S1#和S2#试桩在设计荷载作用下位移均较小,远小于40 mm,说明桩的设计很保守,符合盐田港50 a不大修的高标准建设要求。

由2根桩的 $Q$ - $s$ 曲线可知:1)桩顶位移滞后于荷载箱上面板位移,且最大试验荷载时桩顶位移非常小,说明桩的侧阻力是从荷载箱到桩顶逐渐发挥的。2)虽然荷载箱布设在平衡点,但下面板位移大于上面板位移,且下面板位移与上面板位移相比先发生,原因主要包括3点。①平衡点基于地勘钻孔以及岩土设计参数推荐值计算,试桩原位地质与地勘钻孔土层及岩土参数推荐值会存在偏差;②灌注桩桩底存在稍许沉渣,导致桩端承载力降低;③于计算的抗拔系数和实际的存在一定误差,导致平衡点计算不准确。3)S1#试桩在7 210 kN后, $Q$ - $s$ 曲线的斜率较之前明显变大;S2#试桩在5 294.5 kN后, $Q$ - $s$ 曲线的斜率较之前明显变大。

### 3.2 各级荷载下桩身轴力

由变形连续条件可知,同一截面的桩身应变和钢筋计应变相同。根据钢筋计标定证书,钢筋计的应力与应变由下式计算得到:

$$\Delta \varepsilon = K_0(f^2 - f_0^2) \quad (8)$$

$$\sigma_s = K \Delta \varepsilon \quad (9)$$

$$\varepsilon_s = \sigma_s / E_s \quad (10)$$

式中: $\Delta \varepsilon$ 为频值; $K_0=0.000\ 711\ 86$ ;  $f$ 为测量频率,Hz; $f_0$ 为零点频率,Hz; $K$ 为标定系数; $\sigma_s$ 为钢筋计应力,MPa; $\varepsilon_s$ 为钢筋计应变; $E_s$ 为钢筋计弹性模量,MPa。

桩身轴力由下式计算:

$$F = \sigma A \quad (11)$$

式中: $F$ 为桩身轴力,kN; $A$ 为桩身横截面积, $\text{m}^2$ ; $\sigma$ 为桩身应力,kPa。

结合式(8)~(11),S1#和S2#试桩的桩身轴力见图4。



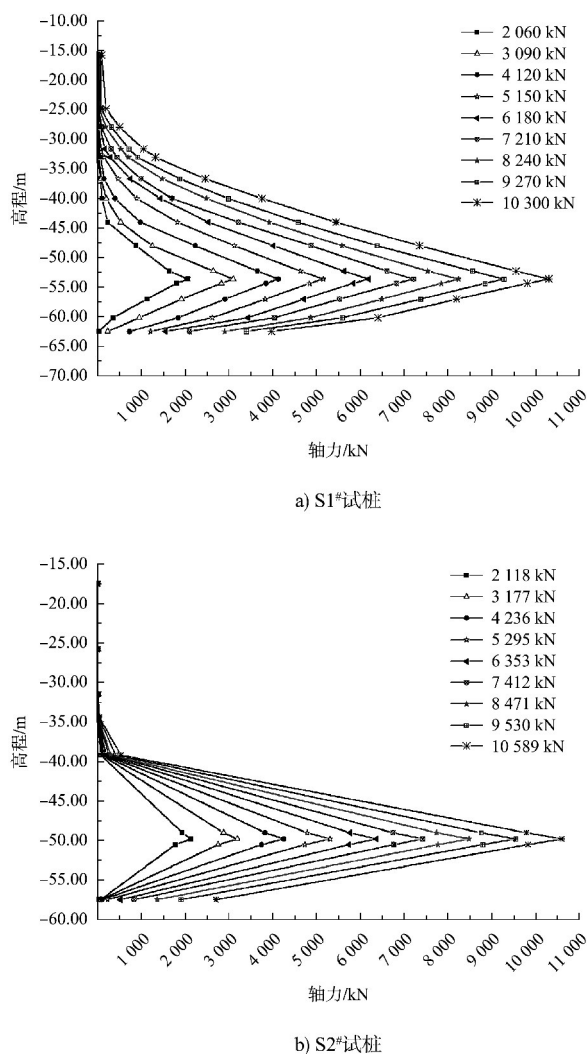


图 4 桩身轴力

Fig. 4 Axial force of pile shaft

由图 4 可知: 1) 桩身轴力随荷载增大而增大, 最大试验荷载时 S1#和 S2#试桩最底下测试断面(高程为-62.5 m)的轴力分别为 3 967.83 与 2 696.26 kN。最底下钢筋计距离桩底较近, 该处轴力可近似当作桩端阻力。2) 越靠近荷载箱, 桩身轴力越大, 说明桩侧阻力从荷载箱往桩顶和桩底两端逐渐发挥, 且荷载主要由角砾岩承担(S1#桩的角砾岩高程范围为-62.50~-31.60 m, S2#桩的角砾岩高程范围为-57.50~-34.36 m)。

### 3.3 桩侧摩阻力、桩端阻力及桩土相对位移关系

根据式(11)得到的桩身轴力, 桩身每 2 个相邻的测试断面  $i$  与  $i+1$  之间的侧摩阻力由下式计算:

$$q_{si} = \frac{|F_i - F_{i+1}|}{ul_i} \quad (12)$$

式中:  $q_{si}$  为测试断面  $i$  与  $i+1$  之间的桩侧摩阻力, kPa;  $F_i$  为测试断面  $i$  处的桩身轴力, kN;  $F_{i+1}$  为测试断面  $i+1$  处的桩身轴力, kN;  $u$  为桩身周长, m;  $l_i$  为测试断面  $i$  与  $i+1$  之间的距离, m。

桩土相对位移量按下式计算:

$$\delta_i = s - L_1 \varepsilon_1 - \sum_{j=2}^i \frac{L_j}{2} (\varepsilon_j + \varepsilon_{j+1}) \quad (13)$$

式中:  $\delta_i$  为上段桩(下段桩)中距离荷载箱上面板(下面板)第  $i$  ( $i \geq 1$ ) 段桩的桩土相对位移, mm;  $s$  为荷载箱上面板(下面板)位移, mm;  $L_1$  为上段桩(下段桩)中距离荷载箱最近的测试断面(即第 1 个)至荷载箱上面板(下面板)的长度, mm;  $L_j$  为第  $j$  段桩的桩长, mm;  $\varepsilon_1$  为上段桩(下段桩)中距离荷载箱上面板(下面板)最近的测试断面(即第 1 个)的钢筋计应变;  $\varepsilon_j$ 、 $\varepsilon_{j+1}$  为上段桩(下段桩)中距离荷载箱上面板(下面板)第  $j$ 、第  $j+1$  个测试断面的钢筋计应变。

根据式(12), S1#和 S2#试桩在最大试验荷载时的桩侧摩阻力发挥值分别见表 4 和 5。

表 4 S1#试桩单向最大试验荷载 10 300 kN 时桩侧摩阻力  
Tab. 4 Shaft friction under the maximum unidirectional test load of 10,300 kN for S1# pile

土层名称	土层高程范围/m	桩侧摩阻力/kPa	备注
粉质黏土、中粗砂	-24.80~-15.70	2.50	上段桩, 钢管段
中粗砂	-27.90~-24.80	22.58	上段桩, 钢管段
粉质黏土	-31.60~-27.90	33.70	上段桩, 钢管段
全风化角砾岩	-33.00~-31.60	44.55	上段桩, 钢管段
	-36.67~-33.00	70.25	上段桩, 钢管段
	-40.00~-36.67	88.75	上段桩, 灌注段
	-44.00~-40.00	96.10	上段桩, 灌注段
	-48.00~-44.00	108.35	上段桩, 灌注段
强风化角砾岩	-52.28~-48.00	117.13	上段桩, 灌注段
	-53.62~-52.28	127.22	上段桩, 灌注段
	-54.36~-53.62	150.06	下段桩, 灌注段
	-57.00~-54.36	139.45	下段桩, 灌注段
	-60.20~-57.00	127.91	下段桩, 灌注段
中风化角砾岩	-62.50~-60.20	239.69	下段桩, 灌注段

表 5 S2#试桩单向最大试验荷载 10 589 kN 时桩侧摩阻力  
Tab. 5 Shaft friction under the maximum  
unidirectional test load of 10,589 kN for S2# pile

土层名称	土层高程范围/m	桩侧摩阻力/kPa	备注
粉质黏土、中细砂、中粗砂	-25.76~-17.46	0.02	上段桩, 钢管段
中粗砂	-31.46~-25.76	0.15	上段桩, 钢管段
残积土	-34.36~-31.46	1.92	上段桩, 钢管段
全风化角砾岩	-39.16~-34.36	23.31	上段桩, 钢管段+灌注段
	-49.00~-39.16	213.89	上段桩, 钢管段
中风化角砾岩	-49.79~-49.00	233.52	上段桩, 灌注段
	-50.50~-49.79	248.67	下段桩, 灌注段
	-57.50~-50.50	231.14	下段桩, 灌注段

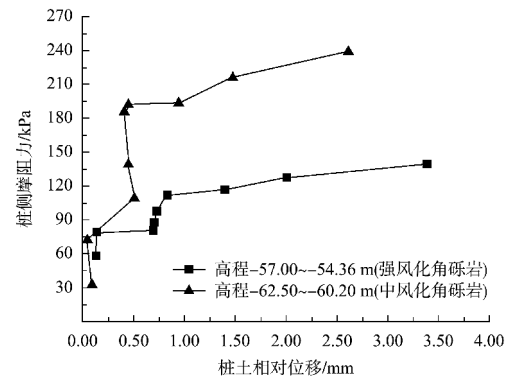
由表 4 和 5 可知: 1) 对于钢管桩段, 全风化角砾岩、强风化角砾岩的抗拔桩侧摩阻力分别不小于 44.55 和 70.25 kPa, 该值较小是由于钢管桩底部距离荷载箱较远, 桩侧摩阻力未充分发挥; 对于灌注桩段, 强风化角砾岩、中风化角砾岩的抗压桩侧摩阻力分别不小于 150.06 和 248.67 kPa, 抗拔桩侧摩阻力分别不小于 127.22 和 233.52 kPa。2) 强风化角砾岩、中风化角砾岩的抗拔折减系数(即抗拔侧摩阻力与抗压侧摩阻力之比)分别为 0.85 和 0.94。

根据 JTS 167—2018《码头结构设计规范》<sup>[13]</sup>与地勘报告, 并按试验结果强风化角砾岩、中风化角砾岩的抗压桩侧摩阻力分别不小于 150.06 和 248.67 kPa 考虑, 试桩 S1#和 S2#的单桩竖向抗压极限承载力的理论计算值分别不小于 28 108.58 和 29 768.71 kN, 与设计抗压承载力 21 000 kN 相比, 分别具有不小于 1.34 和 1.42 的安全系数。

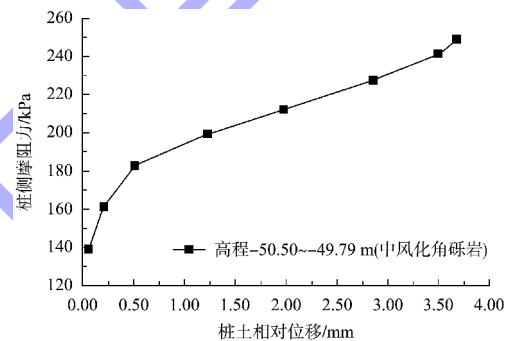
为了进一步揭示桩侧摩阻力发挥机理, 可根据式(13)计算各钢筋计埋设位置处桩土相对位移, 并绘制同一断面处各级荷载作用下桩土相对位移-桩侧摩阻力曲线, 见图 5。

由图 5 可知: 1) 在桩土相对位移小于 0.50 mm 时, 中风化角砾岩桩侧摩阻力快速增加; 在桩土相对位移大于 0.50 mm 后, 中风化角砾岩桩侧摩阻力增长速率趋于稳定, 并随着桩土相对位移的增加而增加。2) S1#和 S2#试桩在最大试验荷载时, 即强风化角砾岩和微风化角砾岩的桩土相对位移分

别小于 2.61 和 3.68 mm 时, 桩侧摩阻力仍未充分发挥, 若试验荷载增大, 则可得到更大的桩侧摩阻力。



a) S1#试桩



b) S2#试桩

图 5 桩土相对位移-桩侧摩阻力关系曲线  
Fig. 5 Curves of pile-soil relative displacement and shaft friction

#### 4 结论

1) 对于灌注桩, 强风化角砾岩和微风化角砾岩的抗压桩侧摩阻力分别不小于 150.06 和 248.67 kPa; 微风化角砾岩的端阻力不小于 2 578.86 kPa。

2) 强风化角砾岩、微风化角砾岩的抗拔折减系数分别约为 0.85 和 0.94。

3) 微风化角砾岩在桩土相对位移大于 0.50 mm 后, 桩侧摩阻力增长速率趋于稳定, 并随着桩土相对位移的增加而增加。

4) 越靠近荷载箱, 桩身轴力越大, 即桩侧阻力从荷载箱往桩顶和桩底两端逐渐发挥。

5) 试桩 S1#和 S2#的单桩竖向抗压极限承载力的理论计算值分别不小于 28 108.58 和 29 768.71 kN, 与设计抗压承载力 21 000 kN 相比, 分别具有不小于 1.34 和 1.42 的安全系数。

## 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] 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.
- [4] 吴荣辉,叶锦峰,骆光杰,等.江苏海岸辐射沙洲地层中大直径钢管桩基础承载性能试验研究[J].海洋工程,2021,39(1): 121-132.  
WU R H, YE J F, LUO G J, et al. Experimental study on the bearing characteristics of steel pipe pile in radial sandbar of Jiangsu Province [J]. The ocean engineering, 2021, 39(1): 121-132.
- [5] 薛振年,田叶青,董亚琴,等.考虑长径比影响的黄土地区钻孔灌注桩桩侧摩阻力取值研究[J].公路交通科技,2022,39(12): 67-74, 85.  
XUE Z N, TIAN Y Q, DONG Y Q, et al. Study on value of lateral friction resistance of bored cast-in-situ pile in loess area considering influence of length-diameter ratio [J]. Journal of highway and transportation research and development, 2022, 39(12): 67-74, 85.
- [6] 张永涛,刘玉擎,陈培帅,等.珊瑚礁灰岩地层灌注桩侧摩阻力特征及发挥系数取值研究与应用[J].岩石力学与工程学报,2023,42(3): 748-757.  
ZHANG Y T, LIU Y Q, CHEN P S, et al. Research and application of lateral friction resistance characteristics and coefficient value of cast-in-place piles in coral reef limestone strata [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2023, 42(3): 748-757.
- [7] 韩高孝,钱重昌.大直径灌注桩土层交界面桩侧摩阻力集聚特性研究[J].水利水运工程学报,2023(6): 161-167.  
HAN G X, QIAN Z C. Research on the accumulation characteristics of pile side friction resistance on soil interface of large diameter cast-in-situ piles [J]. Hydro-science and engineering, 2023(6): 161-167.
- [8] 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.
- [9] 许锡宾,周亮,吴同情,等.内河港口大直径嵌岩灌注桩试验研究[J].水运工程,2015(1): 175-180.  
XU X B, ZHOU L, WU T Q, et al. Test research on large-diameter rock-socketed cast-in-place piles at river port [J]. Port & waterway engineering, 2015(1): 175-180.
- [10] 张永涛,刘玉擎,陈培帅,等.珊瑚礁灰岩地层灌注桩侧摩阻力特征及发挥系数取值研究与应用[J].岩石力学与工程学报,2023,42(3): 748-757.  
ZHANG Y T, LIU Y Q, CHEN P S, et al. Research and application of lateral friction resistance characteristics and coefficient value of cast-in-place piles in coral reef limestone strata [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2023, 42(3): 748-757.
- [11] 徐向阳,吕黄,姚三.深厚沉积层大直径钢管桩承载特性试验研究[J].水运工程,2012(6): 179-182.  
XU X Y, LYU H, YAO S. Experimental study on axial loading-bearing characteristics of large-diameter steel-pipe pile on deep sediment layer [J]. Port & waterway engineering, 2012(6): 179-182.
- [12] 水运工程基桩试验检测技术规范: JTS 240—2020[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2020.  
Technical code for testing and inspection of waterway engineering foundation piles: JTS 240-2020 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2020.
- [13] 码头结构设计规范: JTS 167—2018[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2018.  
Design code for wharf structures: JTS 167-2018 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2018.