中风化泥岩地层钢管灌注组合桩承载性能分析

林运飞[1,2]，魏明晖[1,2]，王琼与[1,2]
（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）

摘要：针对中风化泥岩地层中钢管灌注组合桩的荷载传递机理和承载性能研究缺乏的问题，基于秘鲁某码头工程，通过组合桩的轴向抗压静载试验，对组合桩在中风化泥岩地层中的承载性能进行研究。结果表明：1）组合桩的单桩轴向抗压极限承载力的理论计算值不小于 23 000 kN，与试验桩最大轴向抗压承载力 18 000 kN 相比，安全系数不小于 1.28。2）中风化泥岩在钢管桩内的桩侧摩阻力发挥值不小于 258.10 kPa，在灌注桩内的桩侧摩阻力和桩端阻力发挥值分别不小于 270.45 和 1 845.65 kPa。3）不同荷载作用下，桩身轴力随入土深度增大而衰减，钢管段内衰减幅度小，灌注段内衰减幅度大；试验荷载小于 14 000 kN 时，桩端阻力趋近于 0 kN，大于 14 000 kN 时，桩端阻力逐渐发挥。4）桩土相对位移大于 14.37 mm 时，中风化泥岩桩侧摩阻力增长速率降低，但仍未达到峰值。研究成果可为类似地质条件的工程提供参考依据。

关键词：桩基及深基础；中风化泥岩；轴向抗压静载试验；钢管灌注组合桩；承载性能
中图分类号：U656.1；TU473　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-4972(2026)07-0198-06

Analysis of bearing performance of grouted steel pipe composite piles in moderately weathered mudstone stratum

LIN Yunfei[1,2], WEI Minghui[1,2], WANG Qiongyu[1,2]
(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)

Abstract: Research on the load transfer mechanism and bearing capacity of grouted steel pipe composite piles in moderately weathered mudstone strata is insufficient. Based on a port project in Peru, this study investigates the bearing performance of composite piles in moderately weathered mudstone strata through axial compression static load tests on the composite piles. The results indicate that: 1) The theoretical calculated ultimate axial compressive bearing capacity of a single composite pile is no less than 23, 000 kN. In comparison with the maximum axial compressive bearing capacity of 18, 000 kN of test piles, the safety factor is not lower than 1. 28. 2) Mobilized shaft friction resistance of moderately weathered mudstone inside steel pipe piles is no less than 258. 10 kPa, with further values exceeding 270. 45 and 1, 845. 65 kPa observed for cast-in-place piles under both mobilized shaft friction resistance and pile end bearing resistance. 3) Axial force within the pile diminishes incrementally with increased embedded depth, exhibiting reduced attenuation in the steel pipe section relative to the cast-in-place section. Pile end bearing resistance approaches 0 kN when test loads are below 14, 000 kN. However, it progressively develops as load increases beyond this threshold. 4) When the pile-soil relative displacement exceeds 14. 37 mm, the growth rate of pile end bearing resistance of moderately weathered mudstone piles decreases, but it still does not reach its peak value. The research results can provide reference for engineering practices under similar geological conditions.

Keywords: pile foundations and deep foundations; moderately weathered mudstone; static axial compression load test; grouted steel pipe composite piles; bearing performance

收稿日期：2025-11-25　　**录用日期：**2025-12-29

作者简介：林运飞(1996—)，男，硕士，工程师，从事桩基工程的科研、设计及检测评估工作。

秘鲁某码头工程采用钢管灌注组合桩作为基础结构[1]，设计桩端持力层为中风化泥岩。中风化泥岩作为软岩-中硬岩过渡带的典型岩体，其水敏性强，遇水易软化，导致力学性能劣化，故作为桩端持力层时需进行专项研究。

为了研究灌注桩在轴向荷载下的承载性能，通常采用桩身分层侧摩阻力试验方法，通过在灌注桩钢筋笼的预设位置焊接钢筋应力计等传感器，结合基桩轴向静载试验同步开展分层测试[2]。目前，已有较多学者对中风化泥岩地层灌注桩的承载特性进行了研究。蒋小奎等[3]和蔡行等[4]均采用自平衡静载试验，对不同地区中风化泥岩嵌岩桩的承载性能进行了研究；娄学谦等[5]通过现场足尺试验，分析了抗压桩和抗拔桩在软岩地层的端阻和侧阻发挥特性；李孝平[6]以工程实例开展了基桩持力层为中风化泥岩时的单桩竖向承载力计算研究；Rezazadeh 等[7]采用无侧限抗压强度试验推导了嵌岩桩在泥岩的桩侧承载力；付健阳[8]对中风化泥岩地层为桩端持力层的单桩竖向承载力进行了数值模拟研究。现有研究思路为灌注桩在中风化泥岩地层中的承载特性研究提供了参考，但组合桩在中风化泥岩地层下的静载试验数据仍极为匮乏[9]。因此，准确掌握持力层为中风化泥岩的组合桩承载性能，不仅对码头工程的稳定性和安全性至关重要，也直接影响后续港口的正常运营与维护。

本文基于秘鲁某码头工程的钢管灌注组合桩抗压静载试验数据，采用桩身分层侧摩阻力试验，在进行基桩轴向抗压静载试验时同步进行桩身分层侧摩阻力试验，研究持力层为中风化泥岩地层的组合桩承载性能，并提出侧摩阻力和端阻力的取值建议，旨在为类似地质条件下的桩基设计与施工提供参考。

1　工程与地质概况

秘鲁某码头工程设计为双侧靠船，码头长度 438 m，包括 1 座工作平台，8 座系缆墩和 4 座靠船墩。工作平台上部结构为钢结构框架，基础采用钢管+灌注组合桩型，排架间距 10.05 m，系、靠船墩上部采用现浇钢筋混凝土墩台，下部基础也采用钢管+灌注组合桩型，桩底高程−71～−57 m。采用 E9C320 打桩振动锤和 YC40 打桩液压冲击锤施工，钢管段壁厚 24 mm，桩身混凝土设计强度等级为 C35。

项目位于环太平洋地震带，地震多发，板块运动频繁，地质条件不稳定。根据深水区钻孔揭露，该场区的工程地质层主要为：①$_3$粉土、①$_4$ 粉土、②$_1$ 粉砂、③$_{12}$ 强风化砂岩、③$_{24}$ 中风化泥岩、③$_{32}$中风化页岩、③$_{23}$ 中风化泥岩。土层分布及振弦式钢筋应变计(简称钢筋计)埋设位置见图 1，土层的岩土设计参数见表 1。

本次试桩开展轴向抗压静载试验，以确定桩基的单桩抗压极限承载力桩在各土层的桩侧摩阻力、桩端阻力和桩身应力分布规律等技术参数，检验施工区域钻孔资料的准确性，同时验证现有沉桩设备(E9C320 打桩振动锤、YC-40 液压冲击锤)在典型地层中的沉桩可实施性，从而为后续临时桩、永久结构桩的停锤标准提供数据参考。根据设计要求，在深水栈桥东端试验区域的 S2B 试验桩进行竖向抗压静载试验。通过堆锚结合的方式对试验桩进行竖向抗压静载试验，试验桩采用钢管-灌注组合桩，锚桩为钢管桩，桩基相关参数见表 2。

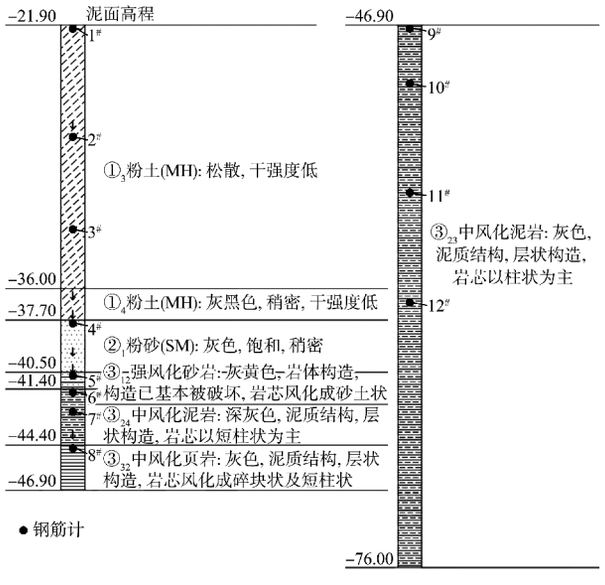

图 1　试验桩土层分布及钢筋计埋设位置(单位：m)

Fig. 1　Distribution of soil layers for test piles and location of rebar strain gauges(unit：m)

表 1　岩土设计参数推荐值

Tab. 1　Recommended geotechnical design parameters

土层编号与名称	土层厚度/m	实测标贯平均击数/击	钻孔灌注桩		钢管桩	
			极限端阻力标准值/kPa	极限侧摩阻力标准值/kPa	极限端阻力标准值/kPa	极限侧摩阻力标准值/kPa
①$_3$ 粉土	14. 1	<1	–	10	–	12
①$_4$ 粉土	1. 7	7. 4	–	15	–	25
②$_1$ 粉砂	2. 8	12. 7	–	45	–	50
③$_{12}$ 强风化砂岩	0. 9	>50	1 800	160	7 000	200
③$_{24}$ 中风化泥岩	3. 0	>50	2 300	160	–	160
③$_{32}$ 中风化页岩	2. 5	>50	2 500	220	–	220
③$_{23}$ 中风化泥岩	29. 1	>50	2 400	220	–	–

表 2　试验桩参数

Tab. 2　Parameters of the test piles

类别	桩型	桩径/mm	桩顶高程/m	钢管段底高程/m	灌注桩底高程/m	最大试验荷载/kN
S2B	钢管灌注组合桩	1 200	6. 75	−42. 5	−60	18 000
锚桩	钢管桩	1 016	8. 00	−47. 6	–	–

根据设计静载试桩技术要求与 JTS 240—2020《水运工程基桩试验检测技术规范》[10]，试验桩 S2B 竖向抗压静载试验的最大试验荷载为 18 000 kN，采用快速维持荷载法，加载与卸载分级进行。加载时分级荷载为最大试验荷载的 1/10，第一级荷载取 2 倍分级荷载。卸载时每级卸载量取加载时分级荷载的 2 倍。

2　施工工艺与试验方案

2. 1　施工工艺

秘鲁某码头工程的钢管灌注组合桩静载试验的施工工艺流程为：钢平台搭设→桩基测量定位→振动锤插桩→液压冲击锤沉桩→测量偏位→送桩→达到停锤标准→搭设静载试验操作平台→反力系统安装→静载试验→反力系统拆除→平台拆除→拔桩。当钢管段打入时，全程进行高应变法检测，打入中风化泥岩并达到停锤标准后，利用型钢在锚桩上架设海上试验平台，随后成孔并浇筑混凝土。

2. 2　试验桩承载力理论计算

根据 JTS 167—2018《码头结构设计规范》[11]，钢管灌注组合桩的轴向抗压承载力可按式(1)、(2)计算：

$$Q_u = U\sum q_{s,i}l_{s,i} + U\sum \varphi_{c,j}q_{c,j}l_{c,j} + \varphi_p q_R A \quad (1)$$

$$\varphi_p = (0.8/d)^{1/3} \quad (2)$$

式中：Q_u 为组合桩的极限抗压承载力；U 为桩身截面周长；$q_{s,i}$、$q_{c,j}$ 分别为第 i 层土钢管桩段和第 j 层土灌注桩段的抗压极限侧摩阻力标准值；$l_{s,i}$、$l_{c,j}$ 为钢管桩段穿过第 i 层和灌注桩段穿过第 j 层土的长度；q_R 为灌注桩段单位面积极限桩端阻力标准值；$\varphi_{c,j}$ 和 φ_p 分别为灌注桩段桩侧阻力、端阻力尺寸效应系数；A 为桩端截面面积；d 为桩径。

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钢筋计，每个测试断面对称布置两个，钢筋计安装位置见图 2。最底下一组钢筋计靠近桩端，且与桩端的距离不小于 1 倍桩径，用以测试桩端阻力。

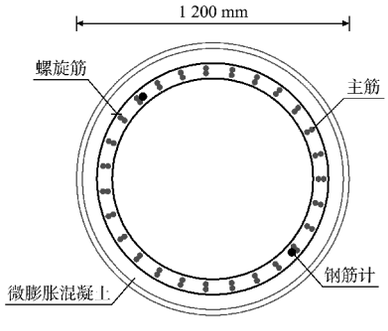

图 2　钢筋计安装位置

Fig. 2　Installation positions of rebar strain gauges

水运工程

3　试验结果与分析

3.1　各级荷载下的桩顶沉降量

试桩设计要求最大试验荷载为 18 000 kN，试验加载过程中该桩最大沉降量为 37.37 mm，卸载后残余沉降量为 2.4 mm，桩顶回弹率为 93.6%。试桩实测 Q-s（Q 为荷载，s 为沉降量）曲线见图 3。

从图 3 可看出，组合桩在轴向抗压静载下的桩顶沉降值符合标准的要求，组合桩的 Q-s 曲线未出现明显的转折点，承载性能相对稳定。通过对组合桩进行高应变检测[12]，分析得出试桩的总承载力为 24 675 kN，远大于最大试验荷载 18 000 kN，进一步说明组合桩在加载阶段，桩身弹性变形、桩侧摩阻力和桩端阻力均表现为线性增长，无明显的塑性屈服或破坏。桩周土层（强风化砂岩和中风化泥岩）在荷载作用下未达到极限状态，位移随荷载变化基本成比例，说明桩的承载性能尚未完全发挥。

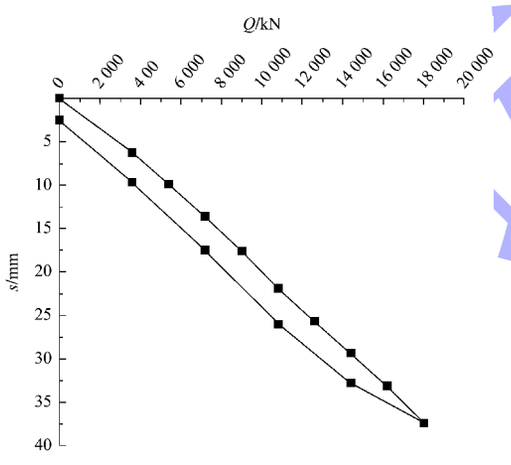

图 3　组合桩的 Q-s 曲线

Fig. 3　Q-s curves of the composite pile

3.2　各级荷载下的桩身轴力

通过分析组合桩在各级荷载下的桩身轴力可知：1）在不同荷载作用下，侧摩阻力逐步发挥，在粉土和砂土层，轴力沿入土深度衰减较慢，在岩层界面，轴力随深度变化开始快速衰减；2）试验荷载小于 14 000 kN 时，桩端轴力趋近于 0 kN，荷载大于 14 000 kN 时，端阻力开始发挥，但占比仍偏低。组合桩在各级荷载下的桩身轴力分布见图 4。

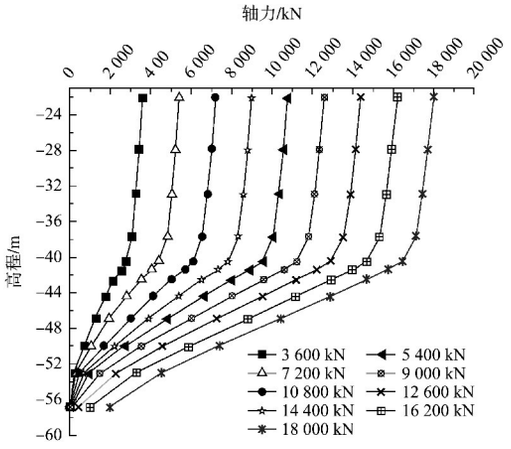

图 4　组合桩在不同荷载作用下的轴力分布曲线

Fig. 4　Axial force distribution curves of the composite pile under different loads

通过对组合桩在最大试验荷载下的端侧阻力进行分析可知：1）对于钢管桩段，强风化砂岩和中风化泥岩在最大试验荷载下的桩侧土阻力发挥值分别不小于 203.61 和 258.10 kPa；2）对于灌注桩段，中风化泥岩和中风化页岩在最大试验荷载下的桩侧土阻力发挥值分别不小于 270.45 和 270.19 kPa，中风化泥岩桩端阻力发挥值不小于 1 845.65 kPa。将土层桩侧与桩端阻力发挥值代入式（1），可得组合桩理论轴向抗压极限承载力为 23 000 kN。试验桩在最大试验荷载 18 000 kN 下的端侧阻力发挥值见表 3。

表 3　最大试验荷载下组合桩的桩侧摩阻力和桩端阻力发挥值

Tab. 3　Mobilized shaft friction resistance and pile end bearing resistance of composite piles under maximum test load

土层名称	土层高程/m	桩侧摩阻力发挥值/kPa	桩端阻力发挥值/kPa	备注
粉土	−27.90～≤−22.0	12.95	–	钢管段
粉土	−32.90～<−27.9	13.82	–	钢管段
粉土	−37.70～<−32.9	18.85	–	钢管段
粉砂	−37.70～<−40.5	64.35	–	钢管段
强风化砂岩	−41.40～<−40.5	203.61	–	钢管段
中风化泥岩	−42.50～<−41.4	258.1	–	钢管段
中风化泥岩	−44.40～<−42.5	250.31	–	灌注段
中风化页岩	−46.90～<−44.4	270.19	–	灌注段
中风化泥岩	−50.00～<−46.9	270.45	–	灌注段
中风化泥岩	−53.00～<−50.0	232.45	–	灌注段
中风化泥岩	−56.80～<−53.0	214.88	1 845.65	灌注段

3.3 桩侧摩阻力与桩土相对位移的关系

根据式(3)、(4)计算桩身轴力与桩土相对位移[13]：

$$f_{s,i}=\left|\frac{P_i-P_{i+1}}{A_i}\right| \tag{3}$$

$$\delta_i=S-L_0\varepsilon_1-\sum_{j=1}^{i}\frac{L_j}{2}(\varepsilon_j+\varepsilon_{j+1})(j+1) \tag{4}$$

式中：P_i、P_{i+1} 分别为第 i、$i+1$ 个钢筋计的测试轴力；A_i 为第 i、$i+1$ 个钢筋计处的桩侧面积；δ_i 为第 i 段的桩土相对位移量；L_0 为桩顶至第 1 层钢筋计之间的距离；L_j 为第 j 桩段长度；S 为桩顶位移量；ε_j、ε_{j+1} 分别为 j、$j+1$ 处的钢筋计应变值。

计算得出桩侧平均摩阻力和桩土相对位移以后，可进一步绘制试桩在同一断面处各级荷载下桩土相对位移-桩侧摩阻力曲线，以进一步揭示桩侧摩阻力的发挥机理。试桩最大荷载下桩侧摩阻力与桩土相对位移见表 4，不同埋深下的桩土相对位移-桩侧摩阻力关系曲线见图 5。

表 4 最大试验荷载下桩侧摩阻力与桩土相对位移

Tab. 4 Shaft friction resistance and pile-soil relative displacement under maximum test load

土层名称	土层高程/m	桩侧摩阻力/kPa	桩土相对位移/mm
强风化砂岩	−41.4～≤−40.5	203.61	21.09
中风化泥岩	−42.5～<−41.4	258.10	20.87
中风化泥岩	−44.4～<−42.5	250.31	20.47
中风化页岩	−46.9～<−44.4	270.19	19.83
中风化泥岩	−50.0～<−46.9	270.45	19.11
中风化泥岩	−53.0～<−50.0	232.45	17.42

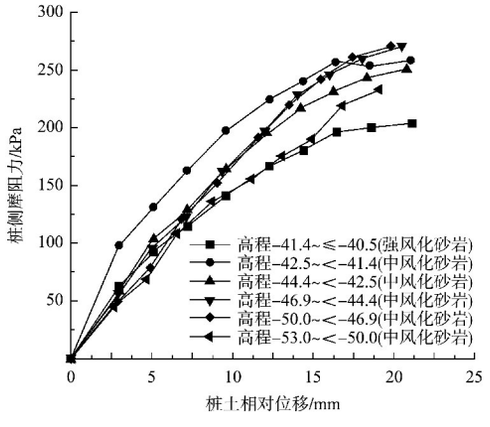

图 5 试验桩不同埋深处桩侧摩阻力与桩土相对位移曲线

Fig. 5 Curves of shaft friction resistance and pile-soil relative displacement of test pile at different embedded depths

由表 4 和图 5 可知：1)随着桩顶轴向压力的增加，各断面处土层的桩侧摩阻力及桩土相对位移逐渐增大。在桩土相对位移小于 14.37 mm 时，中风化泥岩的桩侧摩阻力快速增加；在桩土相对位移大于 14.37 mm 后，中风化泥岩桩侧摩阻力增长速率逐渐降低，并随着桩土相对位移的增加而增加。2)试验桩达到最大试验荷载时，强风化砂岩桩土相对位移为 21.09 mm，逐渐趋于稳定；中风化泥岩自上而下，桩土相对位移分别为 20.87、20.47、19.11、17.42 mm，桩侧摩阻力尚未充分发挥，若继续加载，应能获得更大的桩侧摩阻力。3)在桩土相对位移小于 16.42 mm 时，与强风化砂岩交界处的中风化泥岩桩侧摩阻力显著高于下方的中风化泥岩桩侧摩阻力，究其原因可能是强风化砂岩与中风化泥岩的交界处形成更粗糙的接触面，其表面硬度或胶结程度比下方未受扰动的泥岩更高，增加了桩-土界面的摩擦系数，从而能够提供更大的摩阻力。

4 结论

1）对于钢管桩，中风化泥岩的抗压侧摩阻力不小于 258.10 kPa；对于灌注桩，中风化泥岩和中风化页岩的桩侧摩阻力分别不小于 270.45 和 270.19 kPa，中风化泥岩桩端阻力发挥值不小于 1 845.65 kPa。

2）结合土层桩侧与桩端阻力发挥值，可得组合桩理论轴向抗压极限承载力为 23 000 kN，与高应变法检测出的单桩竖向承载力相近，高于试桩设计轴向抗压承载力 18 000 kN。

3）不同荷载作用下，桩身轴力随入土深度的增大不断衰减，钢管段内的土层衰减幅度小，灌注段内的衰减幅度大；作用荷载小于 14 000 kN 时，桩端阻力趋近于零，大于 14 000 kN 时，桩端阻力开始逐渐发挥。最大加载条件下，实测桩端阻力仅为桩顶荷载的 11.6%，表现为摩擦型桩。

4）土层的桩侧摩阻力及桩土相对位移随着试验轴向抗压荷载的增加而逐渐增大；组合桩在中风化泥岩土层中的桩土相对位移大于 14.37 mm

时，增长速率降低，但仍未达到峰值。

5）本文研究仅通过基桩轴向静载荷试验进行了初步分析，未充分考虑水平荷载的影响，存在一定的局限性。后续的工作中，应在竖向静载试验结果的基础上，进行水平静载试验，或结合数值模拟方法，对组合桩的承载性能做进一步的研究。

参考文献：

[1] 方焘, 刘新荣, 耿大新, 等. 大直径变径桩竖向承载特性模型试验研究(Ⅰ)[J]. 岩土力学, 2012, 33(10): 2947-2952.
FANG T, LIU X R, GENG D X, et al. Model testing study of vertical bearing behaviors for large diameter pile with variable cross-section(Ⅰ)[J]. Rock and soil mechanics, 2012, 33(10): 2947-2952.

[2] 叶上扬, 顾宽海, 施挺. 高桩码头超长组合桩静载荷试桩试验[J]. 水运工程, 2017(10): 113-117.
YE S Y, GU K H, SHI T. Static-load test for super-long combination pile of high-pile wharf[J]. Port & waterway engineering, 2017(10): 113-117.

[3] 蒋小奎, 徐健. 中风化泥岩嵌岩桩竖向承载力性状[J]. 施工技术, 2015, 44(S1): 57-60.
JIANG X K, XU J. Properties of vertical bearing capacity of rock-socked piles in middle weathering mudstone[J]. Construction technology, 2015, 44(S1): 57-60.

[4] 蔡行, 黄质宏, 穆锐, 等. 贵州地区中风化泥岩嵌岩桩承载特性分析[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2020, 37(5): 102-107, 113.
CAI H, HUANG Z H, MU R, et al. Analysis of the bearing capacity of the socketed piles in moderately-weathered mudstone in the area of Guizhou[J]. Journal of Guizhou University(natural sciences), 2020, 37(5): 102-107, 113.

[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] 李孝平. 持力层为中风化泥岩单桩竖向承载力计算探讨[J]. 城市道桥与防洪, 2019(8): 108-111.
LI X P. Calculation and discussion on vertical bearing capacity of single pile in moderately weathered mudstone of bearing stratum[J]. Urban roads bridges & flood control, 2019(8): 108-111.

[7] REZAZADEH S, ESLAMI A. Empirical methods for determining shaft bearing capacity of semi-deep foundations socketed in rocks[J]. Journal of rock mechanics and geotechnical engineering, 2017, 9(6): 1140-1151.

[8] 付健阳. 长春地区中风化泥岩地基承载力研究[D]. 长春: 吉林建筑大学, 2022.
FU J Y. Study on bearing capacity of moderately weathered mudstone foundation in Changchun area[D]. Changchun: Jilin Jianzhu University, 2022.

[9] 胡振华, 王琼与, 娄学谦, 等. 角砾岩地层钢管灌注复合桩承载特性研究[J]. 水运工程, 2025(12): 223-229.
HU Z H, WANG Q Y, LOU X Q, et al. Bearing characteristics of composite pile of steel pipe pile and cast-in-place pile in breccia geology[J]. Port & waterway engineering, 2025(12): 223-229.

[10] 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.

[11] 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.

[12] 蒲玉成. 高应变动力检测技术在水下桩基工程中的应用研究[J]. 中国造船, 2014, 55(3): 140-146.
PU Y C. Application study on high strain dynamic testing technology in underwater pile foundation engineering[J]. Shipbuilding of China, 2014, 55(3): 140-146.

[13] 高鲁超, 戴国亮, 龚维明, 等. 光纤光栅传感技术在大直径灌注桩承载力自平衡法测试中的应用[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2019, 49(4): 688-695.
GAO L C, DAI G L, GONG W M, et al. Application of FBG sensors in self-balanced test method for bearing capacity of large-diameter cast-in-place piles[J]. Journal of Southeast University(natural science edition), 2019, 49(4): 688-695.

（本文编辑　王传瑜）