



坚硬岩抗拔嵌岩桩承载力试验研究

武明¹, 傅一帆^{2,3}, 叶小红⁴, 邱松^{2,3}, 富坤^{2,3}, 李森^{2,3}

(1. 中国矿产资源集团舟山发展有限公司, 浙江 舟山 316281;

2. 中交第三航务工程局有限公司, 上海 200032;

3. 中交集团工程结构重点实验室, 上海 200032; 4. 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032)

摘要: 现行行业规范中存在嵌岩桩抗拔极限承载力计算方法无法应用于嵌岩深度小于 3 倍桩径的情况。在浅覆盖坚硬岩层地质条件下, 利用使用期不承担抗拔荷载的工程桩进行轴向抗拔静载荷试验, 嵌岩深度分别为 2.55 倍桩径和 2 倍桩径。试验中对嵌岩桩采用内外护筒工艺, 将上覆抛石基床及强风化熔结凝灰岩层隔离, 使试验中的荷载全部传递至中风化熔结凝灰岩层, 确保嵌岩桩的抗拔承载力全部由嵌岩桩的嵌岩段提供。试验结果表明, 当岩层为中风化坚硬岩, 嵌岩深度小于 3 倍桩径时, 可应用现行行业规范公式对嵌岩桩极限承载力进行计算。2 根试验桩的极限承载力不小于现行行业规范中极限承载力计算值的 90%。

关键词: 嵌岩桩; 轴向抗拔静载荷试验; 极限抗拔承载力; 嵌岩深度; 坚硬岩

中图分类号: U656; TU473

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)09-0233-05

Experimental study on bearing capacity of uplift rock-socketed piles in hard rock

WU Ming¹, FU Yifan^{2,3}, YE Xiaohong⁴, QIU Song^{2,3}, FU Kun^{2,3}, LI Sen^{2,3}

(1. China Mineral Resources Group Co., Ltd., Zhoushan 316281, China;

2. CCCC Third Harbor Engineering Co., Ltd., Shanghai 200032, China;

3. Key Laboratory of Engineering Structure of China Communication Construction, Shanghai 200032, China;

4. CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: The calculation method for the ultimate bearing capacity of uplift rock-socketed piles in the current specifications cannot be applied to cases where the rock socketed depth is less than 3 times the pile diameter. Under the geological conditions of shallow and hard rock layers, the axial tensile static load test is conducted using engineering piles that do not bear tensile loads during their service life, with rock embedment depths of 2.55 times the pile diameter and 2 times the pile diameter. In this experiment, the inner and outer casing technology is used for the rock-socketed pile to isolate the overlying soil layer and the strongly weathered ignimbrite layer, so that all the loads in the experiment are transferred to the moderately weathered ignimbrite layer, ensuring that the bearing capacity of the uplift rock-socketed pile is fully provided by the rock socketed section of the pile. The test results indicate that when the rock layer is moderately weathered hard rock, and the rock embedment depth is less than 3 times the pile diameter, the current industry standard formula can be applied to calculate the ultimate bearing capacity of rock-socketed piles. The ultimate bearing capacity of two test piles shall not be less than 90% of the calculated ultimate bearing capacity in the current industry standards.

Keywords: rock-socketed pile; axial uplift static load test; ultimate uplift bearing capacity; rock embedment depth; hard rock

收稿日期: 2024-12-12

作者简介: 武明 (1982—), 男, 高级工程师, 注册土木工程师(港口与航道工程), 从事水运工程设计和项目管理工作。

中风化熔结凝灰岩层以灰、浅灰色为主,块状构造,节理裂隙较发育~发育,岩心呈碎块状、短柱状。岩心采取率70%~90%,岩石质量指标RQD约45%。根据饱和及干燥单轴抗压强度试验,中风化熔结凝灰岩的饱和单轴抗压强度值介于64.2~121.2 MPa,平均值为89.3 MPa,标准值为77.9 MPa,属坚硬岩,结合钻孔资料,该层岩体较破碎,因此岩体基本质量等级为Ⅲ级。

为了验证水运领域规范公式适用性,本次试验仅针对中风化熔结凝灰岩层中的嵌岩段进行试验,在嵌岩桩施工时采用双护筒进行嵌岩施工,设置了内外钢护筒,见图3,隔开上部抛石基床及强风化熔结凝灰岩的影响,使嵌岩桩受上拔荷载时不受上覆抛石层、强风化熔结凝灰岩层阻力的影响。

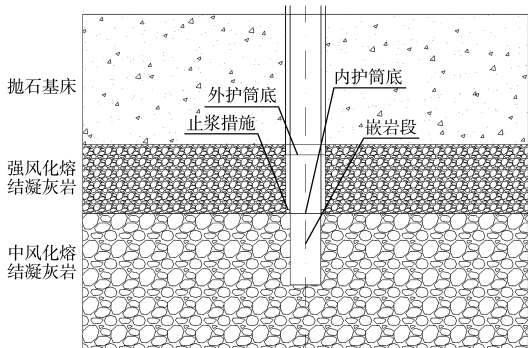


图3 双护筒

Fig. 3 Double casings

本次试验的嵌岩桩施工过程如下:

1) 先将外径1 800 mm的外护筒打入强风化熔结凝灰岩层中,采用旋挖钻机开挖钻孔至岩层顶部,再采用冲击锤破岩,正循环工艺清孔,钻孔直径为1 800 mm。当钻孔渣样中新鲜岩石比例至100%时,停锤确定中风化熔结凝灰岩岩面高程^[7]。

2) 在外护筒内冲击锤破岩的钻孔中下放内护筒,内护筒外径为1 400 mm。由于内护筒施工时为先钻孔再进行植入式施工,因此内护筒底部与岩壁间有一定缝隙,需采用止浆措施,才能保证浇筑桩身混凝土时混凝土浆液不会溢出至内外护筒之间。因此内护筒外侧附带一圈止浆环,内外

护筒之间间隙内铺设沙袋进行止浆,见图4、5。



图4 内护筒外侧附带止浆环

Fig. 4 Outer side of inner casing with a grout stop ring



图5 内外护筒之间铺设沙袋止浆

Fig. 5 Sandbags between inner and outer casing for stopping grout

3) 在内护筒内采用冲击锤钻孔,钻孔直径1 250 mm, S_1 嵌岩钻孔长度为3.2 m, S_2 嵌岩钻孔长度为2.5 m。钻孔至设计高程后,下放嵌岩桩钢筋笼,采用C40混凝土浇筑至桩顶,完成嵌岩桩施工。

4) 完成试验桩后,将内外护筒之间间隙采用级配碎石填满,保证工程桩的安全性。

本次试验通过嵌岩桩施工时采用双护筒设计,将上覆抛石层、强风化熔结凝灰岩层隔开,保证了试验中的荷载全部传递至中风化熔结凝灰岩层,明确了嵌岩桩的承载力全部由嵌岩段提供,有利于保证试验结果的准确性。

2 嵌岩桩轴向抗拔静载荷试验方法

本次试验嵌岩桩极限承载力依据式(1)进行计算,由于中风化岩石轴心抗压强度标准值为77.9 MPa,远高于C40混凝土强度,因此界面强度取较弱的混凝土钢管桩界面^[8-9]。计算时 f_{tk} 按C40混凝土轴心抗压强度标准值计算,取26.8 MPa,

侧阻力为 1 206 kPa，由于试验基于工程桩开展，为保证工程桩不发生破坏，试验荷载取值为极限承载力的 75%~80%。极限承载力计算值及设计试验荷载见表 1。

表 1 试验桩极限承载力计算值、设计试验荷载
Tab. 1 Calculation value of ultimate bearing capacity of test pile and design test load

试验桩	极限承载力计算值/MN	设计试验荷载/MN
S ₁	15. 155	11. 840
S ₂	11. 840	8. 880

本次试验采用 50 MN 级静载反力设备和 6 台 5 MN 油压千斤顶、70 MPa 高压油泵和高压油路系统，用系统标定合格的精密油压表控制荷载。测试系统采用武汉岩海公司生产的 RS-JYC 全自动桩基测试仪。按预计最大试验荷载的 1/10 分级，采用快速维持荷载法。其加、卸载均遵循 JTS 237—2017《水运工程地基基础试验检测技术规程》^[10]中的有关条款规定。每根试验桩在同一平面均匀对称安放 4 只电子位移传感器。试验桩 S₁、S₂ 加载表见表 2。

表 2 试验桩轴向抗拔静载试验加载表
Tab. 2 Loading table for axial tensile static load test of test piles

试验桩	加载方式	序号	荷载 Q/kN	荷载维持时间/min
S ₁	加载	1	2 368	60
		2	3 552	
		3	4 736	
		4	5 920	
		5	7 104	
		6	8 288	
		7	9 472	
		8	10 656	
		9	11 840	
	卸载	12	9 472	15
		13	7 104	
		14	4 736	
		15	2 368	
		16	0	

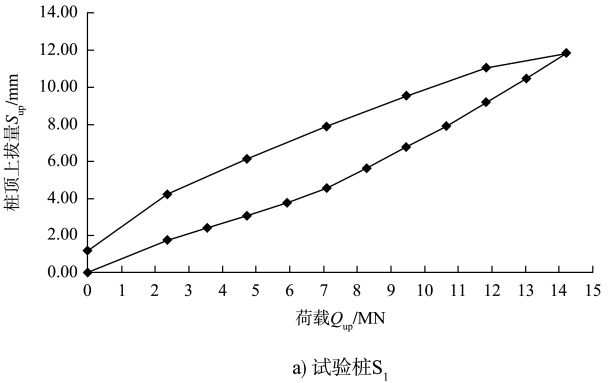
续表2

试验桩	加载方式	序号	荷载 Q/kN	荷载维持时间/min
S ₂	加载	1	1 776	60
		2	2 664	
		3	3 552	
		4	4 440	
		5	5 328	
		6	6 216	
		7	7 104	
		8	7 992	
		9	8 880	
	卸载	12	7 104	15
		13	5 328	
		14	3 552	
		15	1 776	
		16	0	

3 轴向抗拔极限承载力结果

本次试验桩 S₁、S₂ 的设计试验荷载分别为 11. 840 和 8. 880 MN，达到设计试验荷载时，结合加载曲线判断试验桩仍处于弹性阶段，因此试验桩 S₁、S₂ 实际加载时均提高 2 级试验荷载，最大荷载分别达 14. 208、10. 656 MN，2 根试验桩加载至最大荷载时均未破坏，2 根试验桩的 Q_{up}-S_{up} 曲线见图 6。

根据试验结果，当试验桩 S₁、S₂ 最大荷载分别达 14. 208、10. 656 MN，桩顶处最大加载位移达 11. 79、12. 59 mm 时，终止试验时 Q_{up}-S_{up} 曲线并未出现陡升段或明显拐点，嵌岩桩的侧阻力仍呈现线性增长的趋势，嵌岩桩受上拔荷载仍处于弹性阶段。本次试验表明试验桩 S₁、S₂ 单桩轴向抗拔极限承载力推荐值分别不小于 14. 208、10. 656 MN。



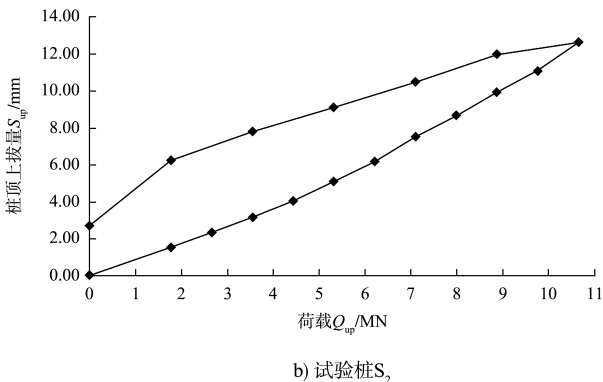


图 6 试验桩的 Q_{up} - S_{up} 曲线
Fig. 6 Q_{up} - S_{up} curve of test piles

4 嵌岩桩侧阻力试验值与计算值对比

本次试验针对文献[1]规范, 对中风化坚硬岩层中嵌岩桩轴向抗拔极限承载力计算条件及方法展开研究。

2 根试验桩的嵌岩深度、按规范公式计算侧阻力标准值、试验最大侧阻力和两者比值见表 3。

表 3 试桩试验结果与规范计算值对比 Tab. 3 Comparison between test results and specification calculated values				
桩号	嵌岩深度/m	按规范公式 计算侧阻力 标准值/kPa	试验最大 侧阻力/ kPa	两者 比值/ %
S_1	3.2(2.55 倍桩径)	1 206	1 131	93.8
S_2	2.5(2 倍桩径)	1 206	1 085	90.0

规范中要求应满足嵌岩深度不小于 3 倍的计算条件才能应用式(1)对嵌岩段的极限承载力进行计算, 但本次试验中, S_1 、 S_2 桩均不满足此应用条件。此外, 本次试验中, S_1 、 S_2 桩最大侧阻力均超过规范公式计算的 90%, 且在试验终止时, 2 根试验桩均未破坏, 表明实际的极限承载力大于该值。

根据本次试验结果, 当岩层为中风化坚硬岩且存在上覆土层, 嵌岩深度为 2~3 倍桩径时, 式(1)可应用于嵌岩桩嵌岩段的极限承载力计算, 极限承载力不小于 0.9 倍计算值。

5 结语

1) 本次试验中对嵌岩桩采用内外护筒工艺,

将上覆抛石基床及强风化熔结凝灰岩层隔离, 使试验中的荷载全部传递至中风化熔结凝灰岩层, 确保嵌岩桩的抗拔承载力全部由嵌岩桩的嵌岩段提供。

2) 试验结果表明 2 根试验桩的极限承载力不小于现行行业规范中极限承载力计算值的 90%。

3) 本次试验结果表明, 当基岩为坚硬岩且风化程度不高于中风化时, 嵌岩深度 3 倍以内的钻孔灌注型嵌岩桩, 可依据现行水运行业规范公式, 并将公式结果乘以 0.9 的安全系数计算嵌岩桩的极限承载力, 结果具有一定安全性。

参考文献:

[1] WANG C H, YANG T X, MA C T, et al. Calculation of uplift capacity of steel pipe pile with constrained grouting [J]. Rock and soil mechanics, 2024, 45 (3): 846-856.

[2] WANG Q K, HU Z B, GUO Y J, et al. Investigation on uplift behavior of rock-socketed belled piles in horizontal and inclined ground using 1-g model test and 3D numerical method [J]. Rock mechanics and rock engineering, 2024, 57(5): 3371-3391.

[3] KANG G O, KIM Y S, KIM J G . Uplift capacity and failure mechanism for belled pile embedded in soft-rock ground[J]. Geomechanics and engineering, 2023, 35 (3): 271-286.

[4] 林宗元. 岩土工程试验监测手册[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1994.

LIN Z Y. Geotechnical testing and monitoring manual [M]. Shenyang: Liaoning Science and Technology Publishing House, 1994.

[5] 邱敏, 胡睿杰, 王超, 等. 软弱地层钢管桩嵌岩深度及侧阻力特性[J]. 水运工程, 2021(2): 160-165.

QIU M, HU R J, WANG C, et al. Rock socketed depth and lateral resistance characteristics of steel pipe in soft rock[J]. Port & waterway engineering, 2021(2): 160-165.

[6] 水运工程桩基设计规范: JTS 147-7—2022[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2022.

Code for design of pile foundation on port and waterway engineering: JTS 147-7-2022[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2022.