

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.05.013



嵌岩扩底抗拔桩承载特性现场试验研究

张文涛¹, 马建林¹, 王滨², 杨柏¹

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031; 2. 国家电网四川省电力公司, 成都 610041)

摘要: 依托国网路平—富乐 500 kV 双回线路工程中嵌岩抗拔桩极限载荷试验, 针对其中 3 根嵌岩扩底抗拔桩, 对其桩顶荷载—位移关系曲线、桩身轴力及桩身侧摩阻力等特性进行分析。结果表明, 对所处岩土层相同、桩长接近的抗拔桩, 嵌岩扩底抗拔桩较等截面桩不但能够显著提高极限抗拔荷载, 而且能够有效降低桩顶位移。扩大头所处岩层性质对其所能提供的抗拔力影响较大, 处于中风化岩层中的扩大头所提供的抗拔力要显著大于位于强风化岩层中的扩大头所提供的抗拔力。对同为扩底型的嵌岩抗拔桩, 桩长较短时, 扩大头提供的抗拔力占桩体极限抗拔荷载的比例更高, 扩大头的扩底作用更显著。对于扩大头位于中风化岩层且扩大头上部等截面段具有一定厚度的黏土层与强风化岩层的抗拔桩, 其等截面段与黏土层、强风化岩层接触部分极限侧摩阻力可在规范建议标准值的基础上, 根据工程实际适当提高。

关键词: 抗拔桩; 承载特性; 极限载荷; 桩身轴力; 桩侧摩阻力

中图分类号: TU473.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2018)05-0102-07

Field test study on bearing capacity of rock-embedded under-reamed uplift piles

Zhang Wentao¹, MA Jianlin¹, Wang Bin², Yang Bai¹

(1. Department of Geotechnical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China;
2. Sichuan Electric Power Design & Consulting Co., Ltd, Chengdu 610016, P. R. China)

Abstract: Based on the ultimate load test of the national power grid of 500kV transmission line project from Luping to Fule, this paper carried out the ultimate load test of 3 rock-socketed piles with enlarged base. The load-displacement curves, distribution of axial force of pile shaft and shaft resistance were investigated. Results show that, when the piles located in the same layer of rock-soil and the length are reached, the enlarge base pile can not only increase the ultimate uplift bearing capacity, but also reduce the displacement of pile top than the pile of uniform section. The properties of the rock mass of the enlarged head have great influence on the uplift force. For the rock socketed uplift pile with enlarged bottom, the uplift force of the enlarged head is higher than that of the ultimate uplift load of the pile, and the expansion action of the enlarged head is more significant. The uplift pile of a clay layer with a certain thickness and a strong weathered layer in a medium weathered layer with enlarged head and a uniform section at the upper

收稿日期: 2018-01-10

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFC0802203-1)

作者简介: 张文涛 (1991-), 男, 主要从事桩基础、边坡治理研究, E-mail: zwtswjtu@163.com.

Received: 2018-01-10

Foundation item: Nation Key R & D Program of China (No. 2016YFC0802203-1)

Author brief: Zhang Wentao (1991-), main research interests: pile foundation and slope control, E-mail: zwtswjtu@163.com.

end of the enlarged head, the limit side friction of the section with the clay layer and the strong weathered rock layer can be improved appropriately according to the actual situation of the project on the basis of the recommended by the building codes.

Keywords: uplift piles; bearing capacity; ultimate load; shaft forces of pile; resistance of pile

输电线塔作为架设电力线路的基本结构,一般要承受较大的竖向上拔荷载,故需在电塔基础设置抗拔桩,而扩底抗拔桩由于成本低,能显著提高极限抗拔荷载,故在电力建设中得到越来越多的应用。Nazir等^[1]通过室内试验得出,桩径比对扩底抗拔桩抗拔荷载影响显著,最大抗拔力随桩径比的增加而增大,而密砂中模型抗拔力较在松砂中提高了约60%。Lin等^[2]研究发现,砂土内摩擦角对扩底抗拔桩抗拔力有明显影响。密砂中(内摩擦角 $35^{\circ}\sim 42^{\circ}$)抗拔桩抗拔力较松砂中(内摩擦角 $30^{\circ}\sim 35^{\circ}$)有提高。Hong等^[3]通过分析法研究了抗拔桩嵌入长度、桩表面粗糙程度以及土体抗剪强度对抗拔力的影响,并设置短桩与长桩来研究临界埋置深度的影响。分析法得出的结果与试验结果吻合良好。Harris等^[4]分别就松、密砂采用6种不同嵌入形状的桩体进行了试验分析,得出在使扩底抗拔桩下部突出后,抗拔桩承载力有一定幅度上升,其土体影响范围也有一定程度增加。Xiong等^[5]得出在上拔力作用下,桩身应力主要作用于轴线,随着半径和深度的增加而减小,桩侧摩阻力从上到下逐渐减小。Shelke等^[6]在试验中考虑了长径比、内摩擦角、土-桩摩擦角、土的密度和群结构的影响,并提出一种考虑拱效应的理论方法来预测嵌岩桩的极限抗拔力。群桩的抗拔承载力随着间距的增大呈线性增加,在长细比从10增至40后,承载力降低了84%。王卫东、吴江斌等^[7-10]对扩底抗拔桩在东部沿海软土地区的应用作了深入研究,对扩底抗拔桩的承载特性、扩大头承载机理等通过试验、数值模拟等手段得出,扩大头在埋深不同的条件下,由扩大头提供的抗拔承载力相差不大,且扩大头周边土体法向力是扩大头抗力的主要成分。袁文忠等^[11]通过室内试验,研究了岩基强度对嵌岩抗拔桩承载力的影响,发现桩在受拉拔过程中,岩基强度越高,应力影响范围和破坏面的夹角越大。徐壮涛等^[12]通过现场试验与数值模拟发现,扩底抗拔桩桩身变形量占桩顶变形比例达80%。周治国等^[13]通过现场试验,对嵌岩扩底抗拔桩的具体应用给出了一些建议,提出当上部结构对抗拔桩桩顶

变形比较敏感时,宜采取措施控制桩身变形,而不是单一提高桩的极限抗拔承载力。杨旺兴^[14]通过慢速维持荷载试验法和反演分析方法开展了试验研究,试验、反演结果表明,直径抗拔短桩的抗拔性能较好,其荷载传递函数简单,破坏模式为倒圆锥体破坏。刘波等^[15]通过现场试验及数值分析得出,在极限状态下,扩大头处提供的荷载占总上拔荷载的50%左右。

随着中国电力事业的不断发展,在西南地区,输电线线路越来越多的在山区中走线。就扩底抗拔桩而言,针对西南地区“上土下岩”(即上部土层、下部岩石)地质条件作用下的研究偏少。为此,本文依托于国家电网路平-富乐500 kV双回线路工程中极限荷载试验,针对项目中的扩底抗拔桩,对嵌岩扩底抗拔桩的极限承载力、桩身轴力等进行了分析,以此研究嵌岩扩底抗拔桩的承载特性。

1 试桩试验概况

1.1 工程概况及地质条件

如前所述,该工程依托国网路平-富乐双回路嵌岩扩底抗拔桩极限荷载试验,试验场地位于广元市利州区宝轮镇红星村七组。根据现场地质勘查报告,主要地层如下:粉质黏土,厚约0.3~3 m,呈可硬可塑状;强风化砂岩,厚约1~3 m,属极软岩;中风化砂岩,持力层,未揭穿。抗拔桩地质剖面图见图1,岩土层物理力学性能指标见表1。

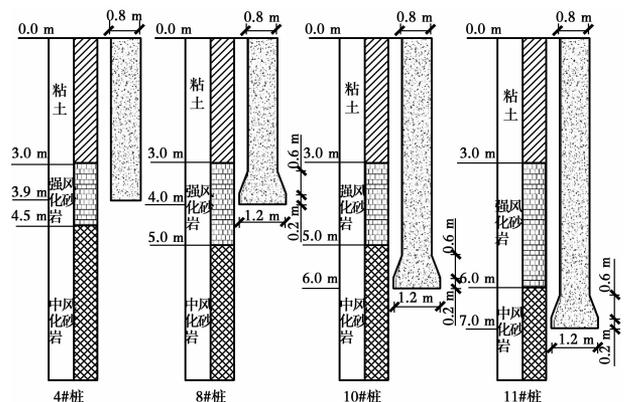


图1 试桩地质剖面图

Fig. 1 Profile of piles

表1 岩土物理力学性能指标一览表

Table 1 Physical and mechanical properties of rock and soil

岩土层名称	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	孔隙比 e	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	压缩模量/ MPa	岩石饱和单轴 抗压强度/ MPa	塑性指数	液性指数
粉质黏土	19.5	0.798	32.3	12.5	5.45		16.6	0.31
强风化砂岩	23.8		1 000.0	32.0	2.10	5.4		
中风化砂岩	25.0		1 500.0	40.6	2.70	22.4		

1.2 试桩概况

该工程抗拔桩极限载荷试验共测试桩径 0.8 m, 扩底抗拔桩 4 根, 对其中 8#、10# 以及 11# 扩底抗拔桩进行研究。为与等截面桩比较分析, 将试验桩径 0.8 m 的等截面 4# 桩引入。扩底抗拔桩干钻施工, 上部采用旋挖钻孔的成孔施工工艺, 下部扩大头采用人工挖孔施工工艺, 扩底高度为 1 倍桩直径, 扩底直径为 $D+2 \times 200 \text{ mm}$ (D 为桩直径)。试桩尺寸见表 2。

表 2 抗拔桩尺寸表
Table 2 Parameters of piles

桩号编号	桩径/mm	扩底底面 桩径/mm	桩长/mm	扩底高 度/mm
4#	800		3 900	
8#	800	1 200	4 000	800
10#	800	1 200	6 000	800
11#	800	1 200	7 000	800

试验采用《建筑基桩检测技术规范》(JGJ 106—2014)^[16] 推荐的慢速维持荷载加载法加荷, 为确定各桩的抗拔极限承载力, 试验加载至破坏或出现不可再加载的情况为止。现场采用两根同径工程桩作为反力支座, 为试验桩提供反力, 在每个支座上安放 1 个 6 000 kN 千斤顶。

为削弱加载时出现偏心荷载的影响, 在桩顶设置 $1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$ 桩帽, 抗拔桩的主筋伸入桩顶上部设置的钢筋混凝土桩帽, 通过桩帽把上拔力传递给试桩。现场单桩极限载荷试验装置见图 2。



图 2 极限载荷试验装置现场图片

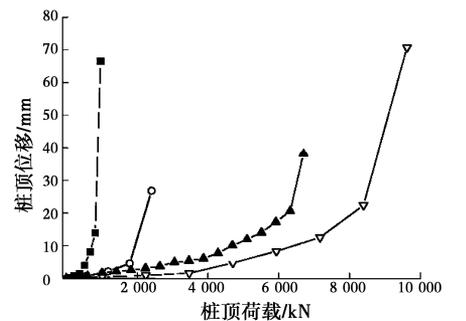
Fig. 2 Site image of ultimate load test

试桩试验中, 进行了桩顶位移测试。为测试桩身轴力, 每根试桩根据桩长不同布置不等量钢筋应变计, 应变计从桩顶开始布置, 每隔 0.5 m 布置一个直至桩底。为测试方便, 各桩桩顶标高均设置为 0.0 m。

2 试验结果分析

2.1 荷载-位移曲线

试验得到 4 根试桩的桩顶荷载-位移关系曲线如图 3, 试桩试验结果见表 3。



注: —■— 4#桩 —○— 8#桩 —▲— 10#桩 —▽— 11#桩

图 3 桩顶荷载-位移关系曲线

Fig. 3 Load-displacement curve of pile top

表 3 各桩极限载荷试验结果

Table 3 Results of pile tests

试桩编号	极限荷载/ kN	极限荷载对应 桩顶位移/ mm
4#	823	13.9
8#	1 796	4.6
10#	6 328	20.6
11#	8 396	22.4

以 10# 桩为例, 试桩在最后一级荷载作用下对应桩顶上拔位移 17.7 mm, 超过前一级荷载作用下的 5 倍(3.36 mm), 可见, 试桩达到破坏状态。由图 3 可知, 3 根嵌岩扩底抗拔桩桩顶荷载-位移曲线表现特征与等截面桩相同, 均呈陡变型, 这与文献[8]中所得出的扩底抗拔桩位于软土地区的桩顶荷载-位移曲线表现特征一致。

由图 3 可见,4# 桩与 8# 桩所处岩土层相同,桩长接近,桩顶作用相同荷载时,8# 扩底桩桩顶位移要明显小于 4# 等截面桩桩顶位移。由表 3 可知,4# 桩极限荷载、对应的桩顶位移分别为 823 kN、13.9 mm。8# 桩极限荷载、对应的桩顶位移分别为 1 796 kN、4.6 mm。可见,对岩土层相同,桩长接近的抗拔桩,嵌岩扩底抗拔桩较嵌岩等截面桩不但能够显著提高抗拔极限荷载,而且能够有效降低桩顶位移。

10# 桩与 11# 桩相比,相对来说,增加桩长会显著提高极限抗拔力,但桩顶位移也会有一定幅度的增大。

2.2 桩身轴力曲线与桩侧摩阻力曲线

依据各量测截面处的钢筋计应力,按式(1)求得各级荷载下桩身轴力,按式(2)求得各级荷载下桩身侧摩阻力。3 根扩底抗拔桩在各级荷载下桩身轴力-深度曲线见图 4,侧摩阻力-深度曲线见图 5。

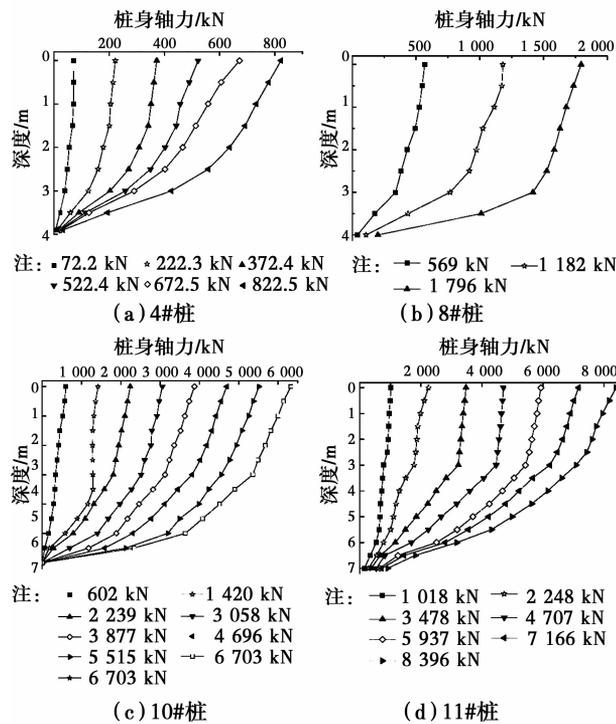


图 4 各级荷载下桩身轴力-深度曲线
Fig. 4 Distribution of shaft forces of pile tests

$$N_{ij} = \sigma_{ij} A_{si} + \frac{\sigma_{ij} E_s}{E_c} A_{ci} \quad (1)$$

$$f_{ij} = \frac{N_{ij} - N_{(i-1)j}}{A_i} \quad (2)$$

式(1)中: N_{ij} 为第 i 量测断面在第 j 荷载作用下的桩身轴力; σ_{ij} 为第 i 量测断面钢筋应力计在第 j 荷载作用下的应力; A_i 为第 i 量测断面钢筋总面积;

E_b 为桩身混凝土弹性模量; E_s 为钢筋弹性模量; A_{ci} 为第 i 量测断面混凝土面积。

式(2)中: f_{ij} 为第 $i \sim i+1$ 量测断面之间在第 j 级荷载下的桩身侧摩阻力; A_i 为第 $i \sim i+1$ 量测断面之间的桩侧面积; $N_{(i-1)j}$ 为第 $i-1$ 量测断面处在第 j 级荷载下的轴力。

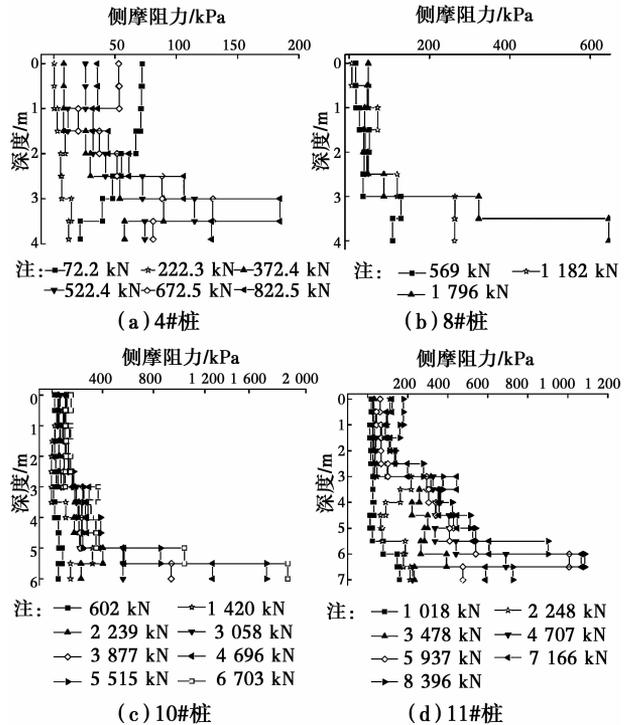


图 5 各级荷载下侧摩阻力-深度曲线
Fig. 5 Distribution of side resistance of pile tests

从图 4 中可以看出,各级桩顶荷载作用下桩身轴力沿深度逐渐减小,并且在不同岩土层中减小速率各异。随着荷载的增加,上覆土层中轴力曲线斜率开始趋于稳定,同时,岩层中桩身轴力曲线斜率不断增大。

根据受力平衡原理,桩身轴力曲线在一定程度上可以反映桩侧土体提供的抗拔力。以 10# 桩为例,桩顶作用超过 2 248 kN 的荷载后,岩层提供的抗拔力超过岩土层整体提供的 80%,该比例随桩顶荷载的增加有小幅增大,极限荷载作用下该比例达到 85%,说明对上覆土嵌岩扩底抗拔桩,桩顶荷载超过某一量值后,在提供抗拔力的作用中,岩层开始起主要作用。

由于试桩并未在扩大头与等截面分界处安放钢筋计,为方便分析,将上一段量测区间内轴力曲线斜率延伸至等截面段与扩底段分界面处,作为扩大头与上一量测区间的轴力变化曲线,以此来计算扩大

头提供的抗拔力。3 根扩底桩在极限荷载作用下, 扩大头提供的抗拔力见表 4。

表 4 极限荷载作用下扩大头提供的抗拔力
Table 4 Bearing capacities of enlarged base

桩号	扩大头提供的抗拔力/kN	桩顶极限荷载/kN	扩大头所占比例/%
8#	1 417	1 796	76.5
10#	3 472	6 328	54.9
11#	2 918	8 396	34.7

极限荷载作用下, 4# 等截面桩嵌岩段(长度 0.9 m)提供的抗拔力为 426 kN。与此对应, 8# 桩高度为 0.8 m 的扩大头提供的抗拔力为 1 417 kN, 是 4# 桩嵌岩段的 3.3 倍。

分析表 4, 11# 桩与 10# 桩相比, 桩长增加 1.0 m, 且扩大头均位于中风化砂岩中, 但就扩大头提供的抗拔力而言, 11# 桩(2 918 kN)却小于 10# 桩(3 472 kN), 说明桩长的增加对扩大头所能提供的抗拔力无增益作用。

反观 8# 桩, 3 根扩底抗拔桩扩大头尺寸相同, 但 8# 桩扩大头提供的抗拔力(1 417 kN)要明显小于 10# 与 11# 桩, 根据前文所述, 桩身长度对其无较大影响, 分析认为, 扩大头所处岩层性质是主要影响因素。根据图 1, 8# 桩扩大头位于强风化砂岩中, 10# 与 11# 桩扩大头均位于中风化砂岩中, 故而造成 8# 桩扩大头提供的抗拔力要小于 10#、11# 桩。

由表 4 可知, 对同为扩底型的抗拔桩, 8# 桩扩大头虽提供的抗拔力明显小于 10#、11# 桩, 但扩大头提供的抗拔力占桩体极限抗拔荷载的比例(76.5%)却明显高于 10#(54.9%)、11# 桩(34.7%)。这说明对同为扩底型的抗拔桩, 桩身整体较短时, 扩大头的扩底作用更显著。

由图 5 可知, 在中风化岩层中, 11# 桩简化下的扩大头处的桩侧侧摩阻力可以达到 1 000 kPa, 对 10# 桩, 其值可以超过 1 800 kPa。对处于强风化岩层中的扩大头, 从图 5(b)可以看出, 侧摩阻力也可以达到 600 kPa, 而根据《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)^[17]所提供抗拔极限承载力标准值, 强风化岩层中侧摩阻力最大仅可取到 220 kPa, 这说明由于嵌岩抗拔桩扩大头抗拔作用的复杂性, 将扩大头的抗拔特性简化成仅依靠桩侧侧摩阻力的作用, 有一定的不合理性。

对于嵌岩扩底抗拔桩扩大头上部等截面段的侧摩阻力, 从图 5 可以看出, 整体上随桩顶荷载的增加

而增大。极限荷载作用下, 等截面段上覆土层及强风化岩层段侧摩阻力平均值见表 5。

表 5 极限荷载作用下等截面段侧摩阻力平均值
Table 5 Measured value of side resistance

桩号	侧摩阻力/kPa	
	上覆土层	强风化砂岩
8#	50	
10#	128	270
11#	174	418
3 根试桩平均值	117	344

由于钢筋应变计的埋设是从桩顶开始布置, 并且每隔 0.5 m 布置一个, 直至桩底钢筋计的埋设, 导致 8# 桩强风化岩层中等截面段侧摩阻力无法准确测出, 故未在表 5 中列出。

从表 5 可以看出, 极限荷载作用下, 11# 桩与 10# 桩相比, 中部强风化岩层厚度增加 1 m, 等截面段上覆土层与强风化岩层的侧摩阻力均有不同幅度的提高, 这说明对扩大头位于中风化岩层、上覆一定厚度土层的扩底抗拔桩, 中部夹强风化岩层厚度的增大, 会对上覆土层、中部强风化岩层的侧摩阻力具有一定程度的提升。换种角度来看, 相对来讲, 扩底抗拔桩桩长的增加对上部等截面段上覆土层、强风化岩层侧摩阻力的发挥有积极作用。

8# 桩与 10# 桩、11# 桩相比, 桩长较短, 且扩大头位于强风化岩层中, 这导致 8# 桩上覆土层侧摩阻力要明显小于后两者。这也从侧面印证了扩底抗拔桩的桩长对上覆土层侧摩阻力的发挥具有一定的影响。

3 扩底抗拔桩等截面段桩侧摩阻力试验值与规范标准值对比

根据《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)所提供的桩的极限侧摩阻力标准值, 试验的黏土层为 66~82 kPa, 强风化岩层为 140~220 kPa。

由于 8# 桩施工时未能做好扩大头上部等截面段桩体与土层之间的接触, 极限荷载作用下 8# 桩上覆土层侧摩阻力为 50 kPa, 要小于规范提供的最小值。考虑到规范的保守性, 可见抗拔桩施工时桩与土层摩擦特性将直接影响抗拔桩的承载力, 施工时应注意控制两者之间的接触。

表 5 中, 将 10# 桩与 11# 桩极限荷载作用下扩大头上部等截面段岩土层侧摩阻力与标准值相比较, 可以看出试验上覆土层侧摩阻力(151 kPa)与强

风化岩层的侧摩阻力(344 kPa)均要显著大于规范提供标准值的最大取值(分别为82、220 kPa)。这说明对于扩大头位于中风化岩层且上部具有一定厚度的黏土层与强风化岩层的扩底抗拔桩,对其等截面段的黏土层与强风化岩层,规范中提供的抗拔极限侧阻力标准值具有很强的保守性。

4 结论与建议

依据3根嵌岩扩底抗拔桩的极限载荷试验,对其桩顶荷载-位移,桩身轴力及桩身侧摩阻力等进行了分析,得出结论与建议如下:

1)对所处岩土层相同,桩长接近的抗拔桩,嵌岩扩底抗拔桩较等截面桩不但能够显著提高极限抗拔荷载,而且能够有效降低桩顶位移。对桩端位于强风化岩层的抗拔桩,由扩大头提供的抗拔力是长度接近的等截面桩嵌岩段的3.3倍。

2)扩大头提供的抗拔力与抗拔桩桩长无紧密联系,扩大头所处岩层性质对其所能提供的抗拔力影响较大,处于中风化岩层中的扩大头所提供的抗拔力要显著大于扩大头位于强风化岩层时提供的抗拔力。

3)对同为扩底型的嵌岩抗拔桩,桩长较短时,扩大头提供的抗拔力占桩体极限抗拔荷载的比例更高,扩大头的扩底作用更显著。

4)对于扩大头位于中风化岩层且扩大头上部等截面段具有一定厚度的黏土层与强风化岩层的抗拔桩,其等截面段与黏土层、强风化岩层接触部分极限侧摩阻力可在规范建议标准值的基础上根据工程实际情况适当提高。

限于场地及经费,未设置常规等截面抗拔桩与10#、11#扩底型抗拔桩相比较,故无法在现场试验中实现扩底型抗拔桩与等截面抗拔桩的定量比较。在后续分析中,可利用室内实验及有限元软件对该部分进行进一步研究。

参考文献:

[1] NAZIR R, MOAYEDI H, PRATIKSO A, et al. The uplift load capacity of an enlarged base pier embedded in dry sand [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2015, 8(9):1-12.

[2] LIN J G, HSU S Y, LIN S S. The new method to evaluate the uplift capacity of belled piles in sandy soil [J]. *Journal of Marine Science & Technology*, 2015, 23(4):523-533.

[3] HONG W P, CHIM N. Prediction of uplift capacity of a micropile embedded in soil [J]. *Ksce Journal of Civil*

Engineering, 2015, 19(1):116-126.

- [4] HARRIS D E, MADABHUSHI G S P. Uplift capacity of an under-reamed pile foundation [J]. *Geotechnical Engineering*, 2015, 168(6):526-538.
- [5] XIONG H, LIU R, XU Y. Characteristic and 3D Numerical simulation analysis of uplift pile bearing capacity in urbans [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2013, 21(3):400-407.
- [6] SHELKE A, PATRA N R. Effect of arching on uplift capacity of pile groups in sand [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2008, 8(6):347-354.
- [7] 王卫东,吴江斌,王向军. 基于极限载荷试验的扩底抗拔桩承载变形特性的分析[J]. *岩土工程学报*, 2016(7):1330-1338.
- WANG W D, WU J B, WANG X J. Ultimate load tests on bearing and deformation behavior of uplift piles with enlarged base [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016(7):1330-1338. (in Chinese)
- [8] 王卫东,吴江斌. 深开挖条件下抗拔桩分析与设计方法[J]. *建筑结构学报*, 2010(5):202-208.
- WANG W D, WU J B. Design and analysis of uplift pile under deep excavation [J]. *Journal of Building Structures*, 2010(5):202-208. (in Chinese)
- [9] 吴江斌,王卫东,王向军. 软土地区多种桩型抗拔桩侧摩阻力特性研究[J]. *岩土工程学报*, 2010(Sup2):93-98.
- WU J B, WANG W D, WANG X J. Side resistance properties of multiple uplift piles in soft soil area [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010(Sup2):93-98. (in Chinese)
- [10] 常林越,王卫东,吴江斌. 基于极限承载力试验的扩底抗拔桩承载特性数值模拟分析[J]. *岩土力学*, 2015(Sup1):657-663.
- CHANG L Y, WANG W D, WU J B. Numerical simulation analysis of uplift behavior of enlarged base piles based on uplift ultimate bearing capacity tests [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015(Sup1):657-663. (in Chinese)
- [11] 袁文忠,于志强,谢涛. 岩基强度对嵌岩抗拔桩承载力影响的试验研究[J]. *西南交通大学学报*, 2003(2):178-182.
- YUAN W Z, YU Z Q, XIE T. Vertical bearing capacity of rock-socketed piles influenced by batholith strength [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2003(2):178-182. (in Chinese)
- [12] 徐壮涛,张静. 旋挖扩底抗拔桩受力机理及扩底段作用机制研究[J]. *建筑结构*, 2016(8):65-69.
- XU Z T, ZHANG J. Study on stress mechanism of enlarged-base uplift pile and enlarged-base interaction

- mechanism [J]. *Building Structure*, 2016(8):65-69. (in Chinese)
- [13] 周治国, 唐孟雄, 董晓斌, 等. 嵌岩旋挖扩底抗拔桩工程应用研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009 (Sup2): 3838-3843.
ZHOU Z G, TANG M X, DONG X B, et al. Application to bearing capacity of rock-emeeffed under-reamed uplift piles [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009 (Sup2): 3838-3843. (in Chinese)
- [14] 杨旺兴. 大直径嵌岩抗拔桩承载性能及反演分析[J]. *国防交通工程与技术*, 2016, 14(3):39-41.
YANG W X. On the bearing performance of a large-diameter anti-up lifting rock-socketed pile and the inversion analysis of it [J]. *Traffic Engineering & Technology for National Defence*, 2016, 14(3):39-41. (in Chinese)
- [15] 姚梅红. 嵌岩抗拔桩承载力评估及其抗浮的优化设计 [J]. *福建工程学院学报*, 2016, 14(3):218-222.
YAO H M. The evaluation of bearing capacity and the optimization design of anti-floating capacity for forrock-socketed anti-uplift piles [J]. *Journal of Fujian University of Technology*, 2016, 14(3):218-222. (in Chinese)
- [16] 建筑基桩检测技术规范: JGJ 106—2014 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
Techical code for testing of building foundation pile: JGJ 106-2014 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014. (in Chinese)
- [17] 建筑桩基技术规范: JGJ 94—2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
Techical code for build ing pile foundations: JGJ 94-2008 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)