

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2016.06.003



基础尺寸对碎石土地基扩底基础上拔承载力影响的现场试验研究

崔强¹,童瑞铭¹,刘生奎²,鲁先龙¹

(1 中国电力科学研究院,北京 102401;2 甘肃省电力设计院,兰州 730050)

摘要:影响基础上拔承载能力的因素包括地基土物理力学参数及基础尺寸参数,而确定混凝土方量最小、基础上拔承载力最大的基础参数配比是基础优化设计的关键。以戈壁滩碎石土地基中的原状土扩底基础为研究对象,采用正交设计方法,以立柱直径、深宽比、扩展角为影响因素,以基础上拔承载力为分析指标,设计出9组尺寸的足尺基础。通过现场试验,获得了各试验基础的荷载-位移曲线和上拔承载力值,提出了采用渐变率的概念表征荷载-位移曲线的非线性变化特征,通过分析发现基础荷载-位移曲线渐变率与承载能力呈负相关。结合正交试验分析结果,得出立柱直径、深宽比、扩展角3个因素中对碎石土地基原状土扩底基础抗拔承载能力的影响程度由大到小依次为深宽比、立柱直径、扩展角,表明在戈壁滩碎石土地基基础的工程设计中增加深宽比能提高基础抗拔承载能力。

关键词:碎石土;原状土;输电线路;扩底基础;上拔承载力

中图分类号: TU475 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2016)06-0017-07

Experimental analysis of the influence of foundation size parameters on the uplift bearing capacity of the spread foundation in gravel soil

Cui Qiang¹, Tong Ruimin¹, Liu Shengkui², Lu Xianlong¹

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, P. R. China;

2. Gansu Electric Power Design Institute, Lanzhou 730050, P. R. China)

Abstract: The uplift bearing capacity of the spread foundation is determined by not only soil physical and mechanical characteristics but also its geometry shapes and scales. The foundation size parameters to determine the minimum quantity of concrete, and the maximum uplift bearing capacity, are key to optimize the foundation design. In order to study their effect on the uplift bearing capacity of the foundation, the undisturbed soil spread foundation in Gobi gravel soil is took as the case. Nine full size test foundations are designed, which use orthogonal test method selected column diameter, the extension angle of the foundation foot and the depth-to-width ratio as influencing factors and the uplift bearing capacity of the foundation as examining goal. The in-site static load tests are carried out in the Gobi gravel soil located northwest China. Load-displacement curves of nine test foundations are obtained and the uplift bearing capacity corresponding are concluded. An index named gradual change ratio is proposed to expressing

收稿日期:2016-04-01

基金项目:国家电网公司科技项目(GCB17201400162)

作者简介:崔强(1980-),男,博士,高级工程师,主要从事输电线路岩土工程试验检测研究,(E-mail)everjsl@126.com。

Received:2016-04-01

Foundation item: State Grid Corporation Science and Technology Project(No. GCB17201400162)

Author brief: Cui Qiang (1984-), PhD, senior engineer, main research interest: test detection on geotechnical engineering in transmission line project, (E-mail) everjsl@126.com.

plastic deformation characteristic of soil foundation under pull load. Meanwhile, the results of the tests show that the sensitivity sort of these geometry factors on the uplift bearing capacity is the depth-to-width ratio, column diameter, and the extension angle of the foundation foot. The conclusion achieve in this work is that adding the depth-to-width ratio in foundation design is an effective measure for improving the uplift capacity of the spread foundation in Gobi gravel soil.

Keywords: gravel soil; undisturbed soil; transmission line; spread foundation; uplift bearing capacity

原状土扩底基础(输电线路工程中又称“掏挖基础”)是指利用人工或机械的方法在原状土地基中钻(挖)成基础设计外形的基坑,然后将钢筋骨架和混凝土直接浇注于基坑而成的原状土基础,已广泛应用于输电线路、高耸建筑物等结构的基础工程中。此类基础的上拔承载力主要受基础结构强度、基础几何特征及其周围土体的物理力学性质影响。在高电压等级输电线路中,杆塔基础往往承受几百吨乃至上千吨的上拔荷载。在工程设计中,为了提高基础承载力,往往通过增加桩径、埋深及扩大头的尺寸等一系列技术手段来提高基础的上拔承载力。然而,如何确定最优的基础尺寸、使基础上拔承载力最大是基础优化设计的核心问题。

针对碎石土地基基础抗拔承载特性方面的研究较多。Chen 等^[1]对粗粒土和细粒土 2 种地基钻孔灌注桩的上拔荷载-位移特性进行了大量统计分析,对比分析了不同失效准则获取基础上拔承载力的差异;Qian 等^[2]、鲁先龙等^[3-4]在新疆和甘肃开展了输电线路杆塔真型基础的现场上拔试验,分析了荷载-位移变化特征,并采用双曲线模型对 46 个基础样本的荷载-位移曲线进行了拟合,分析了模型拟合参数的不确定性;张振华等^[5]采用有限差分法对某碎石土地基扩底基础在上拔和水平组合荷载作用下的变形破坏过程进行了数值分析,概化出上拔土体破裂面形态的几何模型。郝冬梅等^[6]根据塑性极限平衡原理,建立了抗拔土体的极限平衡方程,采用变分法求得不同加载条件下基础承载力的数值解,分析了抗剪强度参数、水平荷载对基础承载力的影响。上述研究工作均未涉及基础尺寸参数对其抗拔承载特性影响的研究。

针对基础抗拔承载特性影响因素也有一些研究。Matsuo^[7-8]通过室内模型试验分析了砂土和黏土中扩大头形状对基础上拔承载力影响,表明在底板混凝土方量一定条件下,圆形扩大头较方形扩大头承载能力高;Dickin 等^[9-10]通过离心机试验分析了埋深、扩底直径、填土密度和基底扩展角对砂土中扩底桩上拔特性的影响;Hesham 等^[11]通过模型试验分析了砂土中锥形桩的承载力随围压增长的

变化规律,得出高围压下锥形桩的上拔承载力与等截面桩上拔承载力相差不大的结论;刘文白等^[12]应用颗粒流理论研究了黄土中扩底桩抗拔承载特性,发现增加扩底桩扩大段的高度对提高承载力有效;陈仁朋等^[13]通过大尺寸模型试验得出在非饱和及饱和粉土中,扩底桩深宽比在 1~3 范围内变化时,上拔极限承载力对应的上拔位移基本不变,当深宽比达到 5 时,上拔位移有显著增加;喻皓^[14]通过数值计算得出黏土地基条件下,短桩的扩大头对桩体的变形影响较大,而长桩影响较小;李保中等^[15]研究了主柱和扩底尺寸对中国 500 kV 线路工程中粉土地基扩底基础上拔、下压余度的影响规律。上述研究的对象均为细粒土中的抗拔基础,而针对碎石土这类粗粒土中的基础抗拔承载特性均未涉及。

综上所述,目前针对基础尺寸参数对碎石土地基扩底基础抗拔承载特性的研究较少。笔者以戈壁滩碎石土地基中的扩底基础为研究对象,基于正交试验设计理论,选取立柱直径、基础深宽比、基底扩展角 3 个参数为影响因素,以基础上拔承载力为分析指标,通过现场上拔静载试验,分析试验基础的抗拔承载特性以及上述各参数对承载力的影响程度,提出适用于戈壁滩碎石土地基原状土扩底基础的工程优化措施。

1 试验概况

1.1 试验场地条件

试验场地位于甘肃省张掖市高台县境内原 330 kV 张—嘉—回线 173 # 塔位附近,如图 1 所示。根据地勘资料,试验场地的地质参数推荐值见表 1。



图 1 试验场地

Fig 1 The test site

表 1 地基土物理力学参数

Table 1 Physical mechanic index of ground soil

土层	层深/m	天然重度 $\gamma/$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	粘聚力 c/kPa
黄土状粉土	0.1	15	24	8
碎石	6.5	21	42	
卵石	>10	21	40	

1.2 加载系统与加载方案

上拔加载装置由千斤顶、加荷梁、连接框架和反力基座组成,其中,反力基座采用承压桩,承压桩具有足够的刚度,以确保满足地基强度和变形的要求,试验加载装置见图 2。

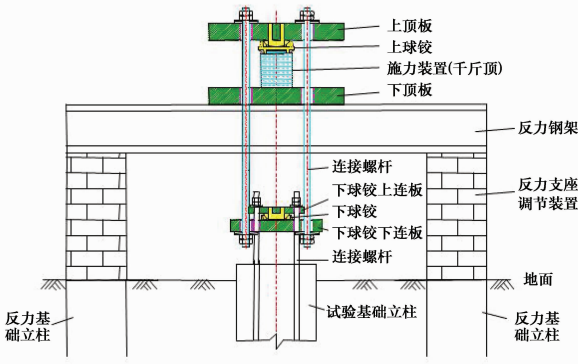


图 2 加载装置

Fig 2 Loading device of field test

试验采用分级加载,加载初期可根据经验采用快速荷载法,当基础变形较大时,采用慢速维持法^[16],以确保地基土的承载性能得以充分发挥。加载过程中通过布置在基顶表面的位移传感器测定上拔位移。

2 试验方案设计

原状土扩底基础上拔承载力受基础几何尺寸参数的影响,如立柱直径 d 、扩展角 θ 、深宽比 h_1/D 、扩底直径 D 等,见图 3。不同因素对基础承载力影响程度不同,为了综合分析上述各参数对基础承载力的影响,同时考虑各因素之间的相关性,分别选取立柱直径 d 、深宽比 h_1/D 、基底扩展角 θ 为因素,每个因素取 3 个水平进行,如表 2 所示。同时将其他不控制基础承载力的参数(见表 3)设为定值。其中立柱直径 d 以 A 表示,深宽比 h_1/D 以 B 表示,基底扩展角 θ 以 C 表示。

采用 3 因素 4 水平的 $L9(3^4)$ 标准的正交表进行设计,以基础上拔承载力为评价指标,基础设计方案见表 4。

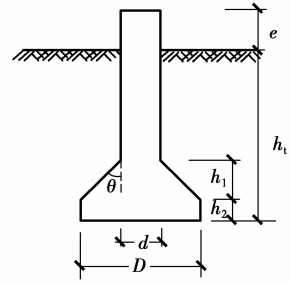


图 3 试验基础示意图

Fig 3 Schematic diagram of test foundation

表 2 各因素及水平

Table 2 All factors and levels

水平	立柱直径 d/mm	深宽比 h_1/D	基底扩展角 $\theta/(\text{°})$
1	800	1.5	10
2	1 200	2.5	20
3	1 600	3.5	30

表 3 其他基础尺寸参数

Table 3 Other size parameters of foundation mm

h_1	h_2	e
600	200	200

表 4 $L9(3^4)$ 正交试验表

Table 4 Orthogonal experiment for $L9(3^4)$

基础编号	1(A/mm)	2(B)	3(C/(°))
1#	1(800)	1(1.5)	1(10)
2#	1(800)	2(2.5)	2(20)
3#	1(800)	3(3.5)	3(30)
4#	2(1200)	1(1.5)	3(30)
5#	2(1200)	2(2.5)	1(10)
6#	2(1200)	3(3.5)	2(20)
7#	3(1600)	1(1.5)	2(20)
8#	3(1600)	2(2.5)	3(30)
9#	3(1600)	3(3.5)	1(10)

3 试验结果分析

3.1 荷载-位移曲线分析

根据表 4 中所列的 9 个基础的现场静载试验,得出 1#~9# 基础的荷载-位移(Q-S)曲线,见图 4。从图中可以看出,1#、2# 基础的 Q-S 曲线属于陡降型,其中 1# 基础最为典型。当加荷值小于某个值时(1# 基础为 390 kN,2# 基础为 840 kN),Q-S 曲线呈现较好的线性关系,当加荷值大于该值时,曲线发生突然跌落。现场试验表明,该级荷载

下,试验基础上拔位移在 24 h 内无法稳定,土体已达到承载能力极限。3#~9#基础的 $Q-S$ 曲线均呈缓变型,缓变型曲线与陡降型曲线之间的不同之处在于: $Q-S$ 曲线在经历一段线性变化后,陡降型曲线发生突然跌落,基础发生破坏,而缓变型曲线则进入非线性变化阶段,直至基础破坏。

土体属于弹塑性变形体,其力学强度与自身的塑性密切相关。因此,采用 $Q-S$ 曲线上非线性段(塑性变形区段)单位荷载的位移变化量表征基础 $Q-S$ 曲线的缓变率,用以说明地基基础的塑性变

形性状。各基础的缓变率统计结果见表 5(表中 A 点表示 $Q-S$ 曲线线性区段终点, B 点表示基础破坏前一级荷载,其值对应的基础上拔极限承载力)。从表 5 可以看出,各基础的缓变率与破坏荷载大体呈负相关(由于加载能力所限,9#基础加至 8 000 kN 即停止加载,而该时刻基础并未破坏),即缓变率越小,曲线的非线性区段轨迹越长,破坏荷载越大。由此表明,戈壁滩碎石土地基原状土扩底基础的抗拔承载能力大小与基础抵抗塑性变形的能力密切相关。

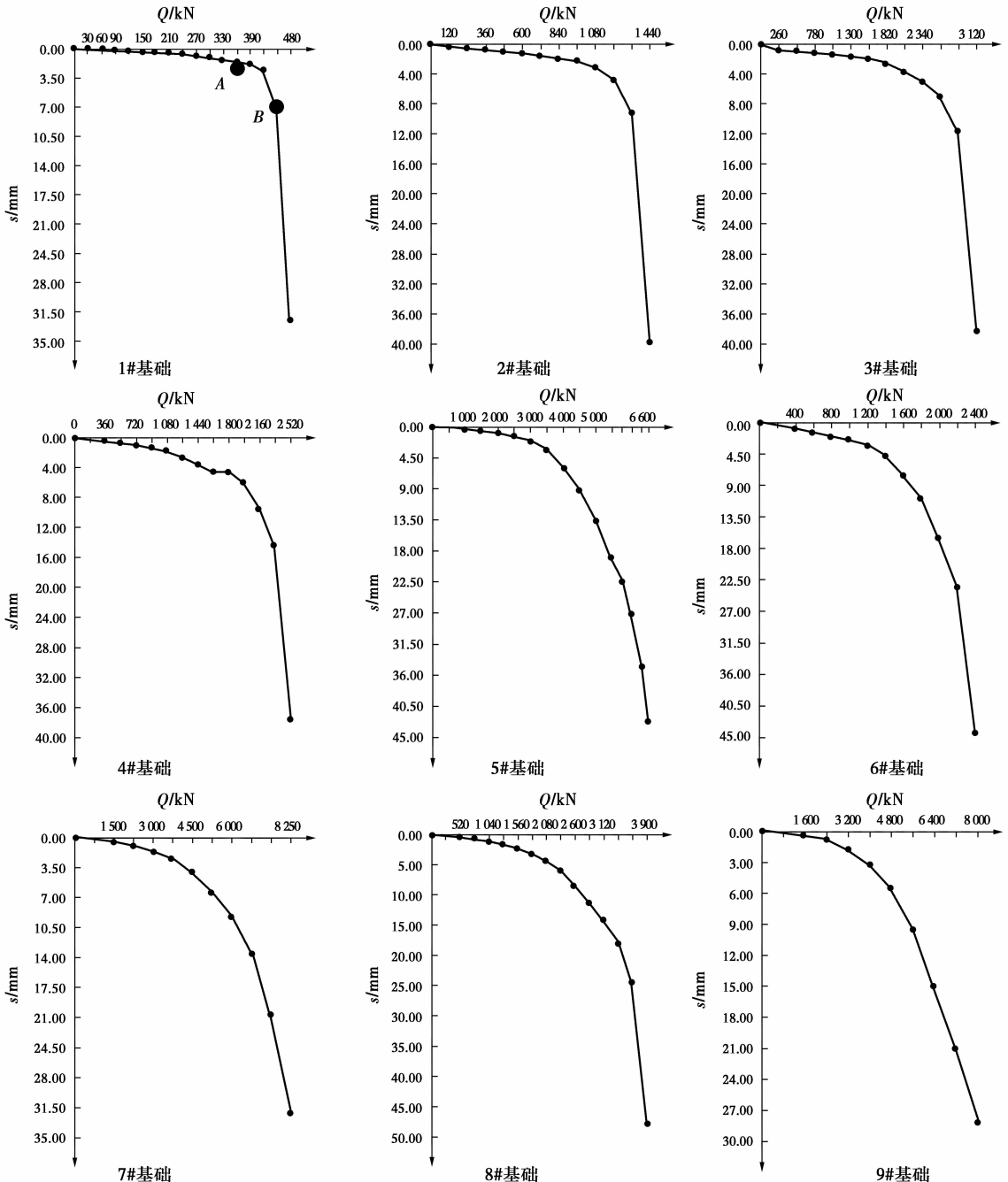


图 4 1#~9#基础 $Q-S$ 曲线

Fig 4 $Q-S$ curves of 1~9# foundations

表 5 试验基础 Q-S 曲线缓变率分析结果

Table 5 The calculated slowly varying rates of load-displacement curves of test foundations

基础 编号	A 点		B 点		((B _{位移} -A _{位移})/ (B _{荷载} -A _{荷载}))/%
	荷载/kN	位移/mm	荷载/kN	位移/mm	
1#	390	1.9	450	32.72	34.24
2#	1 080	3.1	1 320	39.75	10.18
3#	1 300	1.37	2 860	38.37	2.03
4#	1 080	1.83	2 340	37.61	2.48
5#	2 000	0.92	5 800	27.10	0.64
6#	1 200	3.34	2 200	44.40	3.42
7#	3 000	1.52	7 500	32.10	0.58
8#	1 300	1.43	3 640	48.01	1.79
9#	2 400	0.8	7 200	28.24	0.49

3.2 承载力影响因素分析

由上述分析可知,1#~9# 试验基础的 Q-S 曲线分为陡降型和缓变型两种,考虑到数据分析的一致性,统一取破坏荷载前一级荷载为基础的上拔极限承载力,表 6 列出了各试验基础的上拔极限承载力 Q_{cu} 和相应的位移值 S_{cu}。

表 6 基础上拔承载力试验结果

Table 6 Uplift bearing capacity of test foundations

基础 编号	d/mm	h _t /D	θ/(°)	Q _{cu} /kN	S _{cu} /mm
1#	800	1.5	10	450	7.05
2#	1 200	1.5	20	1 320	9.24
3#	1 600	1.5	30	2 860	11.45
4#	1 200	2.5	10	2 340	14.50
5#	1 600	2.5	20	5 800	22.44
6#	800	2.5	30	2 200	23.60
7#	1 600	3.5	10	7 500	20.64
8#	800	3.5	20	3 640	24.23
9#	1 200	3.5	30	7 200	21.10

对各基础上拔承载力进行正交试验结果分析,表 7 列出了正交试验的直观分析结果,其中,K₁、K₂、K₃ 分别为第 1、2、3 水平在 3 因素 A、B、C 中 3 次试验之和, $\overline{K_1}$ 、 $\overline{K_2}$ 、 $\overline{K_3}$ 分别为各水平所对应的平均值。由表 7 可以看出,在立柱直径、深宽比、基底扩展角 3 因素及不同水平组合下,各基础的 Q_{cu} 差别较大,Q_{cu} 随深宽比的增大而最明显地增加,基底扩展角增加,Q_{cu} 变化不大。在 9 组实验中,第 7 组试验 Q_{cu} 最大,值为 7 200 kN,其对应的组合水平为 A₃B₃C₁,第 1 组试验基础上拔承载力最小,Q_{cu} 为

450 kN,水平组合为 A₁B₁C₁。

表 7 基础上拔承载力直观分析结果

Table 7 Analysis on directly perceive method on uplift bearing capacity of test foundations

基础编号	因素			基础上拔承载 力 Q _{cu} /kN
	A	B	C	
1	1	1	1	450
2	1	2	2	1 320
3	1	3	3	2 860
4	2	1	3	2 340
5	2	2	1	5 800
6	2	3	2	2 200
7	3	1	2	7 500
8	3	2	3	3 640
9	3	3	1	7 200
K ₁	6 290	4 630	10 290	
K ₂	10 860	10 340	10 760	
K ₃	16 160	18 340	12 260	
$\overline{K_1}$	2 097	1 543	3 430	
$\overline{K_2}$	3 620	3 447	3 587	
$\overline{K_3}$	5 387	6 113	4 087	
R	3 290	4 570	657	

同一列中,最大值与最小值之差为极差,即表 7 中的 R。R 越大,该列对应的因素对指标 Q_{cu} 影响最明显。由表 7 可知,各列的极差 R 差异较大,表明各因素的水平改变时对指标 Q_{cu} 的影响程度不同。从表中各列极差大小可知,在立柱直径、深宽比、基底扩展角 3 个因素中,对基础上拔承载力影响最为敏感的因素是深宽比,其次是立柱直径,最不敏感的是基底扩展角。

为直观比较,通过 Q_{cu} 与各水平之间的变化趋势来分析各因素对基础上拔承载力的影响程度,分析结果见图 5。从图中可以看出,因素 B 对 Q_{cu} 影响显著,当深宽比从 1.5 增加到 3.5 时,Q_{cu} 指标增加 4 倍左右;因素 A 次之,Q_{cu} 随立柱直径的增加而增加,当立柱直径从 800 mm 增加到 1 600 mm 时,Q_{cu} 指标增加 2 倍左右,增加幅度较因素 B 要小很多;因素 C 对 Q_{cu} 影响最不显著,当扩展角从 10° 增加到 30° 时,Q_{cu} 指标变化很小,接近 1.2 倍,趋势线近乎一条平行于 X 轴的直线,表明工程中增加基础深宽比对于提高基础上拔承载力最为有效,可作为一种基础优化设计的推荐做法;而增加扩展角,一方面对于提高基础承载能力效果不明显,同时,施工中宜引起塌孔和掉石现象,增加了施工的风险性,设计中建议取

值不大于 15° 。

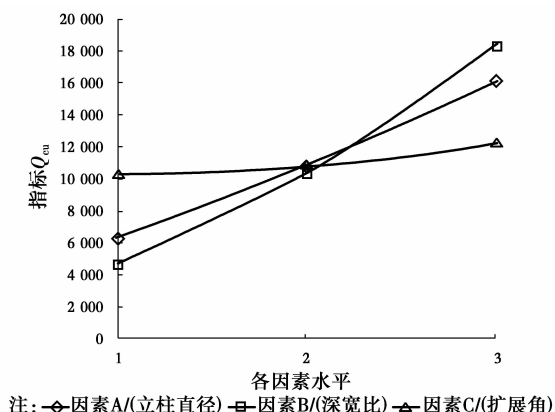


图5 各因素和水平上下拔承载力的变化趋势

Fig. 5 the trend of uplift bearing capacity under different factors and levels

4 结论

基于正交试验分析方法,对戈壁滩碎石土地基中不同几何尺寸参数的9个扩底基础进行了承载力特性试验,并分析得出影响基础上拔承载力最敏感的几何尺寸参数,获得的主要结论和建议如下:

1)通过分析1#~9#试验基础的荷载-位移曲线,得出1#和2#基础属于陡降型,3#~9#属于缓变型。提出缓变率的概念($Q-S$ 曲线非线性区段单位荷载的位移变化量)来表征 $Q-S$ 曲线塑性变形性状,各基础缓变率与破坏荷载呈反比例关系,即缓变率越大,基础承载能力越低。

2)正交试验结果表明,戈壁滩碎石土地基中扩底基础尺寸参数深宽比、立柱直径、基底扩展角的取值对基础上拔承载力影响程度由大到小依次为:深宽比、立柱直径、基底扩展角。

3)在戈壁滩碎石土地基中进行原状土扩底基础的设计过程中,建议优先考虑通过增加深宽比来提高基础上拔承载力。由于扩展角的增加对基础承载力影响不明显,且易导致施工过程中的塌孔和掉石现象,建议扩展角不大于 15° 。埋深和扩展角一定条件下,立柱直径的增加势必导致深宽比减小,同时基础本体混凝土方量也大幅度提高,建议立柱直径以满足施工安全和踏脚板大小即可,而不建议采用提高立柱直径来增加基础上拔承载力的做法。

参考文献:

[1] CHEN J R, CHU T H. Evaluation of uplift interpretation criteria for drilled shaft capacity [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2012, 49: 70-77.

- [2] QIAN Z Z, LU X L, TONG R M. Uplift load-movement response of bell pier foundations in Gobi gravel [J]. Geotechnical Engineering, 2014, 167(4): 380-389.
- [3] 鲁先龙, 乾增珍, 童瑞铭, 等. 戈壁地基扩底掏挖基础抗拔试验及其位移计算 [J]. 岩土力学, 2014, 35(7): 1871-1877.
LU X L, QIAN Z Z, TONG R M, Uplift field tests and displacement prediction on belled piers in Gobi [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(7): 1871-1877. (in Chinese)
- [4] 鲁先龙, 乾增珍, 童瑞铭, 等. 戈壁碎石土地基原状土掏挖基础抗拔试验研究 [J]. 土木建筑与环境工程, 2012, 34(4): 24-30.
LU X L, QIAN Z Z, TONG R M, et al. Field tests analysis on belled pier foundations under tensile load in gravel Gobi [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2012, 34(4): 24-30. (in Chinese)
- [5] 张振华, 崔强, 安占礼. 上拔与水平荷载综合作用下某碎石土地地扩底基础地基土体破裂面形态分析 [J]. 固体力学学报, 2014, 35(Sup): 41-47.
ZHANG Z H, CUI Q, AN Z L. Analysis on characteristics of crack surface in gravelly soils in a certain area of china when spread foundation bearing uplift and horizontal loads [J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2014, 35(Sup). (in Chinese)
- [6] 郝冬雪, 张永建, 陈榕, 等. 输电线路掏挖基础极限上拔承载力变分解法 [J]. 岩土力学, 2015, 36(1): 163-170.
HAO D X, ZHANG Y J, CHEN R, et al. Variational solution of ultimate uplift for excavated foundation of transmission tower [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(1): 163-170. (in Chinese)
- [7] MATSUO. Study on the uplift resistance of footing (1) [J]. Soils and Foundations, 1967, 7(4): 1-37.
- [8] MATSUO. Study on the uplift resistance of footing (2) [J]. Soils and Foundations, 1968, 5(4): 62-98.
- [9] DICKIN E A, LEUNG C F. Performance of piles with enlarged bases subject to uplift force [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1990, 27(5): 546-556.
- [10] DICKIN E A, LEUNG C F. The influence of foundation geometry on the uplift behavior of piles with enlarged bases [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1992, 29(3): 498-505.
- [11] HESHAM M, NAGGER E I, JIN Q W. Uplift behavior of tapered piles established from model piles [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, 37(1): 56-74.

- [12] 刘文白,周健,孟克特木尔. 扩底桩的上拔承载力试验及计算[J]. 工业建筑,2003,33(4): 42-45.
LIU W B, ZHOU J, TEMUER M K. Uplift tests and calculations of under-reamed piles [J]. Industrial Construction, 2003, 33(4): 42-45. (in Chinese)
- [13] 陈仁朋,张革强,孔令刚,等. 饱和及非饱和粉土中扩底桩极限上拔承载力大尺寸模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(5): 1068-1074.
CHEN R P, ZHANG G Q, KONG L G, et al. Large-scale tests on uplift ultimate bearing capacities of enlarged base piles in saturated and unsaturated silty soils [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(5):1068-1074. (in Chinese)
- [14] 喻皓. 影响扩底抗拔桩变形性能的因素[J]. 物流工程与管理, 2011,33(5):120-121.
YU H. Influence of pile deformation resistance to pull enlarged end of performance factors [J]. Logistics Engineering and Management, 2011, 33(5): 120-121. (in Chinese)
- [15] 李保中,陈宇. 直柱掏挖基础主柱及扩底尺寸对承载力影响分析[J]. 工业建筑,2015,45(Sup):1010-1018.
LI B Z, CHEN Y. The bearing capacity analysis on straight chimney excavation foundation with different chimney and enlarged bottom [J]. Industrial Construction, 2015, 45(Sup):1010-1018. (in Chinese)
- [16] 国家能源局. 架空送电线路基础设计技术规程: DL/T 5219-2014 [S]. 北京:中国电力出版社,2015.
National Energy Administration. Technical regulation for designing foundation of overhead transmission line: DL/T 5219-2014 [S]. Beijing: China Electric Power Press,2015. (in Chinese)

(编辑 胡英奎)