

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201812006

一种装配式电力偏心基础的抗拔性能

查晓雄¹, 范佳琪¹, 肖世奎¹, 唐俊宇², 刘克亮³, 赵庆斌⁴

(1. 哈尔滨工业大学(深圳)土木与环境工程学院, 广东 深圳 518055; 2. 国网四川省电力公司, 成都 610041;
3. 国网阿坝供电公司, 四川 茂县 602300; 4. 四川电力设计咨询有限责任公司, 成都 610041)

摘 要: 装配式电力偏心基础是一种新型基础, 这种新型装配式基础目前采用已有的标准进行设计计算, 但水平力和土对基础设计的影响没有考虑。为研究这种新型装配式电力偏心基础的抗拔性能, 首先采用理论计算、有限元模拟, 在斜向荷载逐级加载下对其极限抗拔承载力、基础内部传力规律和单个构件受力情况进行分析, 为验证结果的正确性, 设计一个室内缩尺模型上拔试验。通过结果对比发现: 基础整体未发生上拔破坏; 基础随着埋深逐渐变深向下传递的力逐渐均匀; 单个构件简化计算结果与试验和模拟结果吻合较好。通过基础内部传力规律和单个构件受力分析表明: 目前规程中的基础整体上拔设计方法仍然适用于此新型基础; 水平力和土对基础传力有一定影响, 但对抗拔性能可以忽略不计; 单个构件的简化计算方法可行。

关键词: 偏心基础; 装配式; 抗拔性能; 缩尺模型试验; 有限元模拟

中图分类号: TU470

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2019)12-0167-05

Pull-out performance of an assembled power eccentric foundation

ZHA Xiaoxiong¹, FAN Jiaqi¹, XIAO Shikui¹, TANG Junyu², LIU Keliang³, ZHAO Qingbin⁴

(1. School of Civil and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Shenzhen, Shenzhen 518055, Guangdong, China; 2. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, China;
3. State Grid Aba Power Supply Company, Maoxian 602300, Sichuan, China;
4. Sichuan Electric Power Design and Consulting Co. Ltd., Chengdu 610041, China)

Abstract: Assembled power eccentric foundation is a new type of foundation, which is designed and calculated according to existing standards, but the influence of horizontal force and soil on foundation design has not been discussed. To study the pull-out performance of this new assembled eccentric foundation, the ultimate pull-out capacity, the law of internal force transfer, and the stress of a single component of the foundation are analyzed under progressive loading of oblique loads by theoretical calculation and finite element simulation. To verify the correctness of the results, an indoor pull-up test of a scale model is designed. Based on the comparison of the results, it is found that the whole foundation do not undergo uplift failure. The downward transmitted force gradually become uniform with the increase of the depth of the foundation. The simplified calculation results of a single component are in good agreement with the experimental and the simulation results. The analysis of the internal force transfer law of foundation and the stress of individual member show that the overall uplift design method in the current code is still applicable to this new type of foundation. Horizontal force and soil have certain influence on the uplift of foundation, but the uplift resistance can be neglected. Thus, the simplified calculation method of single member is feasible.

Keywords: eccentric foundation; assembled; pull-out performance; scale model test; finite element simulation

由于输电线路多建于自然条件恶劣的地区, 施工与材料运输都比较困难, 为了解决目前基础中存在的施工难度大效率低等问题^[1-2], 本文提出一种重量轻、安装方便的新型装配式基础。

抗拔性能是输电线路基础最重要的性能指标之一, 国内学者对输电线路基础在上拔荷载作用下已开展较多研究: 文献[3-5]通过试验研究为沙漠地

区输电线路杆塔基础的工程设计提供了依据; 文献[6-7]对基础分别进行抗拔试验和上拔水平力组合试验, 得出水平荷载会降低基础的抗拔性能, 但是对偏心基础同时施加上拔和水平力组合荷载, 基础极限抗拔承载力能得到一定的提高^[8-9], 偏心基础能显著削弱水平力作用的不利影响, 使底板受力更加合理; 文献[10]发现基础埋深 H 与桩径 D 之比对极限抗拔承载力有重要影响; 文献[11]得到装配式基础底板的经验布置方法; 文献[12-13]分别对上拔力作用下基础主材强度变化和上拔扩散角的取值进行研究。上述研究已形成了 DLT 5219—2014《架空输电线路基础设计技术规程》^[14]。

收稿日期: 2018-12-04

基金项目: 国家自然科学基金(51578181); 深圳市 2016 年战略新兴产业发展专项资金(深发改[2016]1025)

作者简介: 查晓雄(1968—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 查晓雄, zhaxx@hit.edu.cn

本文提出的新型装配式偏心基础,与现有的装配式基础存在下列区别:1)装配式基础回填土很难与外部的土质量一致;2)本类型基础本身属于偏心型式;3)需要考虑单个构件在上拔工况下的受力性能.因此本类型基础按照规范中的方法计算需要进行验证.

1 理论分析和有限元分析

本文研究的新型基础见图 1(规定基础偏心布置方向为主视图,对称布置方向为侧视图).

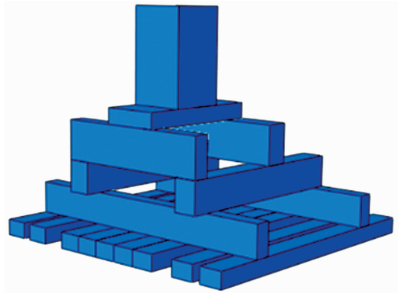


图 1 装配式电力偏心基础示意

Fig. 1 Sketch of the assembled power eccentric foundation

1.1 理论分析

根据文献[14],选用适合回填土基础的土重法,计算公式为

$$\gamma_f T_E \leq \gamma_E \gamma_s \gamma_{\theta l} (V_t - \Delta V_t - V_0) + G_f, \quad (1)$$

式中: T_E 为基础上拔力设计值,kN; V_t 为 h_t 深度内土和基础的体积, m^3 ; ΔV_t 为相邻基础影响的微体积, m^3 ; V_0 为深度内的基础体积, m^3 ; G_f 为基础自重,kN; h_t 为基础的上拔埋置深度,m.其他参数见文献[14].土重法计算简图见图 2.

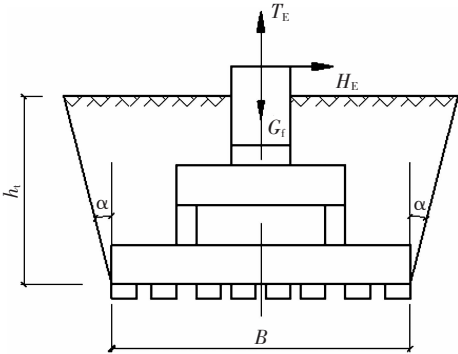


图 2 土重法计算简图

Fig. 2 Soil weight calculation diagram

1.2 有限元分析

采用 ABAQUS/CAE 建立试验基础模型,整个基础包括 3 个部分:上部立柱、中间梁构件和底板.各部件均采用实体单元,模型材料为钢材,钢材密度为 $7\,850\text{ kg/m}^3$,弹性模量为 $2.09 \times 10^5\text{ MPa}$,泊松比为 0.33,定义截面属性为实体截面属性.钢管始终处于弹性变形范围,故做弹性分析;截面特性:均质

的、各项同性;基础底板完全固定,构件与构件之间固接且接触面间无摩擦;基础顶面中心受一斜向荷载,最大荷载为 150 kN,与水平方向夹角为 78° (取 78° 是因为研究与实际工程相关,工程中加载角度即为 78° ;力的投影沿着偏心方向),见图 3;采用六面体网格.构件内力有限元模拟结果云图见图 4.

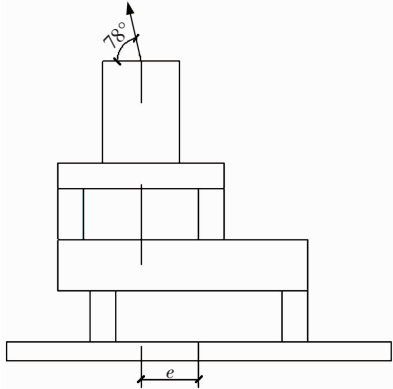


图 3 加载方向说明

Fig. 3 Description of loading direction

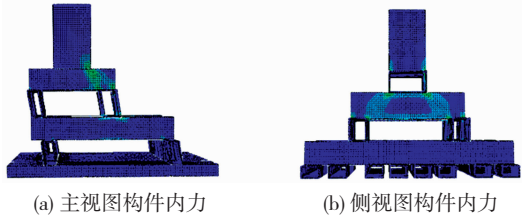


图 4 有限元计算结果云图

Fig. 4 Cloud map of finite element calculation results

2 试验研究

为了验证新型基础是否可以按照现行设计规程计算以及有限元模拟结果是否正确,设计一个比例为 1:2 室内缩尺模型试验^[15].

2.1 试验概况

2.1.1 试验场地条件

所采用回填土物理参数见表 1.

表 1 回填土参数

Tab. 1 Backfill parameters

土的类别	回填土容重 $\gamma_s / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	上拔角 $\alpha / (^\circ)$
黄土状黏土	18.3	20

2.1.2 试件设计

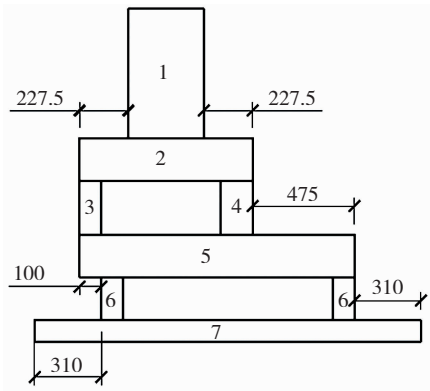
试验基础主要技术参数见表 2.

表 2 技术参数

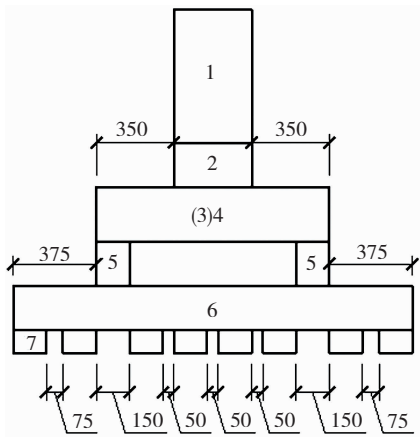
Tab. 2 Technical parameters

基础露头高度 h	基础埋深 H	基础底板尺寸 $(B \times B)$	偏心距 e
0.1	1.45	1.8×1.8	0.3

试验构件设计:本试验用钢管模拟混凝土梁,确保轮廓尺寸一致,钢管与钢管之间采用焊接连接,钢管为 Q235 钢材.基础的拼装示意图见图 5.试验构件参数见表 3.



(a) 主视图



(b) 侧视图

图 5 上拔试验基础拼装示意

Fig.5 Schematic diagram of the pull-up test foundation assembly

表 3 试验基础构件参数

构件编号	构件尺寸($B \times H \times t \times L$)/mm	构件数量
1	350 × 350 × 8 × 600	1
2	350 × 200 × 8 × 805	1
3	100 × 250 × 8 × 1 050	1
4	150 × 250 × 6 × 1 050	1
5	150 × 200 × 6 × 1 100	2
6	100 × 200 × 6 × 1 800	2
7	150 × 100 × 6 × 1 800	8

在上拔试验中,基础顶面同时受到上拔力和水平力,并且这两个力成比例的变化,所以在本次试验中直接将上拔力和水平力计算出一个合力加载在基础顶端,与水平方向夹角为 78° ,现场施工和实际加载见图 6、7。在回填土的过程中为了保证回填质量,采用分层回填夯实的方法。

2.1.3 试验测点布置

为得出装配式基础上拔受力的传力规律,在试验基础节点和构件跨中布置应变片,应变片布置位置见图 8。

2.1.4 加载系统与加载方案

试验系统主要由试验槽土体和试验加载系统两部分组成,试验加载示意图见图 9。试验加载系统由反力梁、液压千斤顶、连接螺栓和连接板等组成。使用

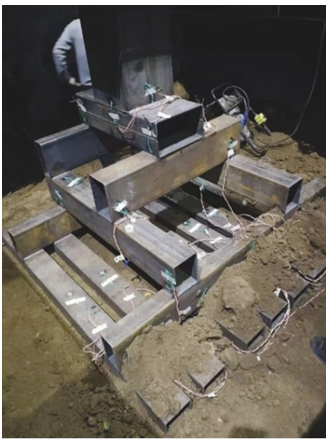


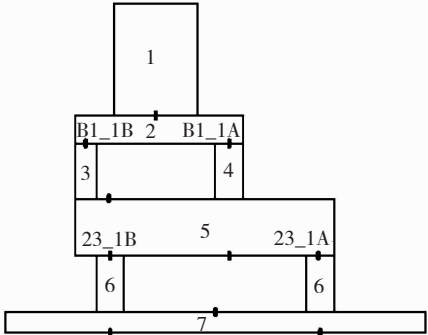
图 6 回填施工现场

Fig.6 Backfill construction

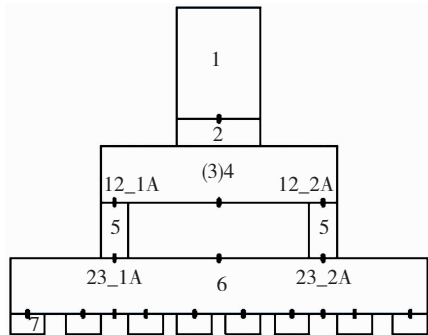


图 7 现场实际加载

Fig.7 Actual loading in the field



(a) 主视图



(b) 侧视图

图 8 应变片测点布置

Fig.8 Strain gauge measurement point layout

的装置为实验室配备的油压千斤顶. 在上拔试验基础的顶部焊上铰接点, 通过与反力梁和千斤顶相连的支座来形成斜向加载的角度, 试验加载通过油泵给千斤顶供油分级加载实现.

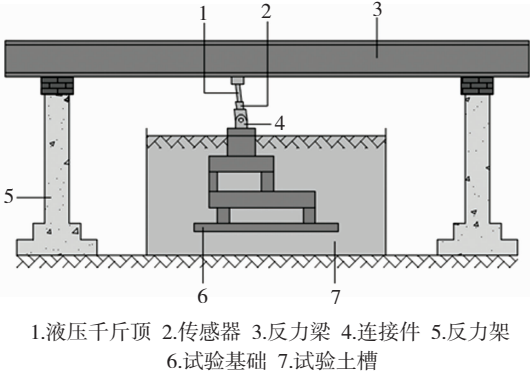


图 9 加载示意

Fig. 9 Loading diagram

根据式(1)计算模型基础的抗拔承载力: $V_t = 7.2 \text{ m}^3$, $\Delta V_t = 0$, $V_0 = 0.55 \text{ m}^3$, $G_f = 0.623 \text{ kN}$, 式中系数按文献[14]取用, 经计算 $T_E = 135.3 \text{ kN}$, 实际加载荷载为 138.3 kN 时, 竖直方向分力为 135.3 kN .

试验采取分级荷载加载方案: 每级荷载为 10 kN , 直到试验构件的钢管发生破坏或者达到预计承载力的下一级荷载时停止加载, 本次实验的预计承载力为 138.3 kN . 在加载过程中, 每级荷载加载完毕后保持, 进行应变记录, 直到加载结束. 卸载时保持一定的速度均匀卸载. 当符合下列情况之一时, 可终止加载: 1) 当某级荷载作用下, 上拔变形量陡增或变形无法停止造成加载困难; 2) 支座在某级荷载作用下, 变形量超过 25 mm 时; 3) 当位移量超过试验基础规定的极限位移量时. 卸载时每级差值与加载时相同, 每个卸载级下恒载 20 min .

在加载过程中, 应变片的数值采用自动采集系统实行连续采集至试验结束. 试验中通过荷载和位移测试系统实现自动加载、补载、恒载及数据记录.

2.2 试验结果与分析

2.2.1 基础极限上拔承载力

由文献[14]中的土重法公式, 计算得出本模型的上拔极限承载力为 138.3 kN , 但试验过程中竖向力和水平力的合力加载到 150 kN 基础也未发生上拔破坏, 说明基础设计时埋深比较富余而且基础中间的回填土密实度较高, 并没有对上拔稳定造成很大影响. 土重法对本基础依旧适用, 但遇到水平力较大、回填土土质较差或者回填土密实度很难达到要求时要考虑折减.

2.2.2 基础节点上拔传力

节点传力通过基础上各测点的应变片测得, 但由于基础节点受力复杂, 试验时应变片粘贴方向存在问题且应变片数量较少, 所得结果不稳定, 故通过有限元模拟得到基础节点上拔传力的规律. 通过图

10(a) 和(b)可知, 右侧节点(图 8(a)中右侧)力大于左侧节点, 这是由于在水平力的作用下, 右侧节点受拉, 左侧节点受压, 竖向力对右侧节点的作用与水平力的作用叠加, 对左侧节点的作用与水平力抵消一部分, 所以右侧节点力大于左侧节点力.

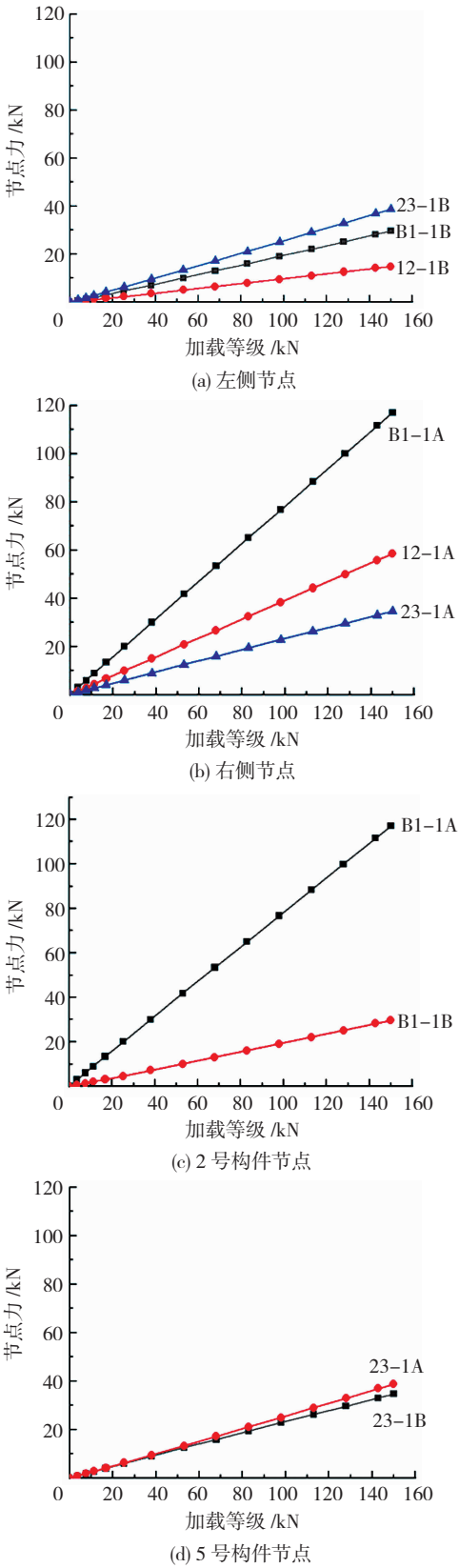


图 10 节点随加载等级应力变化

Fig. 10 Changes of node with loading level stress

通过有限元分析可知,垂直于水平力方向的构件其两侧节点力相等,但与水平力平行的构件,其两端的节点力相差较大,如图 10(c)所示,但是由图 10(c)和(d)可以看出构件两侧节点力越向下传递差距越小,即基础节点的力越向下传递越趋于均匀,这与设计偏心基础的想要达到基础底面受力趋于均匀的要求一致。

2.2.3 单个构件上拔受力分析

单个构件简化为简支梁计算,在有限元计算结果中提取模型中的 3/4/5 三根构件的弯矩与简化计算结果和试验结果对比,计算结果见表 4。

表 4 单个构件受力对比

Tab.4 Force comparison of single components kN · m			
构件编号	简化计算结果	试验结果	有限元模拟结果
3	6.65	6.32	5.17
4	19.95	16.40	15.49
5	12.08	11.66	10.19

根据表 4 可知简化的理论计算结果较为保守,但与有限元模拟结果和试验结果均相差不大,故将构件简化为简支梁计算的方法可行。

3 结 论

- 1)在上拔力的作用下,随着埋深逐渐变深,节点力趋于均匀。
- 2)现行规程中的土重法对本新型基础的整体上拔稳定承载力依旧适用,但回填土土质较差或者回填土密实度很难达到要求时要根据回填土实际密实度考虑折减。
- 3)将单个构件的简化计算结果与试验数据和有限元模拟的结果对比发现,数据偏差不大,简化计算方法稍显保守,可以采用。

参考文献

[1] 鲁先龙,程永锋.我国输电线路基础工程现状与展望[J]. 电力建设,2005,26(11):25
LU Xianlong, CHENG Yongfeng. Current status and prospects of China's transmission line infrastructure engineering[J]. Electric Power Construction, 2005, 26(11): 25. DOI:10.3969/j.issn.1000-7229.2005.11.009

[2] 聂旭初.我国输电线路基础工程现状及优化措施[J]. 中国高新技术企业,2015(19):40
NIE Xuchu. Current status and optimization measures of transmission line foundation engineering in China[J]. China High-Tech Enterprise, 2015(19): 40. DOI:10.13535/j.cnki.11-4406/n.2015.19.019

[3] 鲁先龙,程永锋,丁士君.风积沙地基工程性质及其输电线路基础抗拔设计[J]. 电力建设,2010,31(7):50
LU Xianlong, CHENG Yongfeng, DING Shijun. The engineering properties of aeolian sand foundation and the foundation pullout design of transmission line[J]. Electric Power Construction, 2010, 31(7): 50. DOI:10.3969/j.issn.1000-7229.2010.07.010

[4] 鲁先龙,丁士君,杨文智,等.沙漠风积沙地基扩展基础抗拔现场试验研究[J]. 水利与建筑工程学报,2017,15(5):25
LU Xianlong, DING Shijun, YANG Wenzhi, et al. Field test study on extension foundation of desert sand foundation[J]. Journal of

Water Resources and Architectural Engineering, 2017, 15(5): 25. DOI: 10.3969/j.issn.1672-1144.2017.05.004

[5] 乾增珍,鲁先龙,丁士君.塔克拉玛干沙漠输电线塔装配式基础试验研究[J]. 岩土力学,2011,32(8):2363
QIAN Zengzhen, LU Xianlong, DING Shijun. Experimental study on assembled foundation of transmission tower in Taklimakan Desert[J]. Geotechnical Mechanics, 2011, 32(8): 2363. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2011.08.019

[6] 鲁先龙,乾增珍,童瑞铭.混凝土预制装配式扩展基础抗拔试验[J]. 工程力学,2013,30(1):219
LU Xianlong, QIAN Zengzhen, TONG Ruiming. Extension test of concrete prefabricated extension foundation[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(1): 219. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2011.05.0327

[7] 乾增珍,鲁先龙,童瑞铭.上拔水平力组合荷载作用下混凝土扩展基础承载性能试验[J]. 防灾减灾工程学报,2012(5):577
QIAN Zengzhen, LU Xianlong, TONG Ruiming. Experimental study on bearing capacity of concrete extended foundation under combined horizontal force combined load[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2012(5): 577. DOI: 10.13409/j.cnki.jdpme.2012.05.013

[8] 乾增珍,鲁先龙,丁士君.风积沙地基装配式偏心基础抗拔试验研究[J]. 岩土力学,2013,34(4):1102
QIAN Zengzhen, LU Xianlong, DING Shijun. Field tests on pullout behavior of eccentric grillage foundation in aeolian sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(4): 1102. DOI: 10.16285/j.rsm.2013.04.035

[9] 侯鹏翔,郑卫锋,李维.输电线路沙漠地区偏心装配式基础的承载性能研究[J]. 工业建筑,2016,46(1):104
HOU Pengxiang, ZHENG Weifeng, LI Wei. Research on the bearing capacity of eccentrically assembled foundation in desert area of transmission line[J]. Industrial Construction, 2016, 46(1): 104. DOI: 10.13204/j.gyjz201601020

[10] 郝冬雪,樊广森,姜春宝,等.输电线路掏挖基础的抗拔承载特性数值分析[J]. 水电能源科学,2012,30(8):154
HAO Dongxue, FAN Guangsen, JIANG Chunbao, et al. Numerical analysis of uplift bearing characteristics of digging foundation of transmission lines[J]. Hydroelectric Energy Science, 2012, 30(8): 154. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7709.2012.08.045

[11] 程永锋,郑卫锋,鲁先龙,等.输电线路装配式基础下压计算时底面积取值研究[J]. 岩土力学,2016(增刊1):481
CHENG Yongfeng, ZHENG Weifeng, LU Xianlong, et al. Study on the value of bottom area when calculating the foundation of power transmission line under foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016(S1): 481. DOI: 10.16285/j.rsm.2016.S1.062

[12] 郑卫锋,肖巍,杨文智,等.输电线路钢结构装配式基础抗拔试验[J]. 电力建设,2012,33(6):18
ZHENG Weifeng, XIAO Wei, YANG Wenzhi, et al. Basic uplift test of steel structures for transmission lines[J]. Electric Power Construction, 2012, 33(6): 18. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7229.2012.06.004

[13] 张大长,蒋刚,林致添,等.装配式型钢基础抗压抗拔承载力的试验及计算[J]. 岩土力学,2009,30(7):2100
ZHANG Dachang, JIANG Gang, LIN Zhitian, et al. Experiment and calculation of compressive and uplift bearing capacity of fabricated steel foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(7): 2100. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2009.07.039

[14] 架空输电线路基础设计技术规程: DLT 5219—2014[S]. 北京: 中国计划出版社,2014
Technical specification for basic design of overhead transmission lines DLT 5219—2014[S]. Beijing: China Planning Press, 2014

[15] 刘振亚.国家电网公司输变电工程通用设计:输电线路装配式基础分册[M]. 北京:中国电力出版社,2016:7
LIU Zhenya. General design of transmission and distribution engineering of state grid corporation: Fabricated foundation of transmission lines[M]. Beijing: China Electric Power Publishing House, 2016: 7