

斜坡地形输电线路桩基础设计研究

陈俊帆 蒋锐 黄兴 韩大刚 杨洋

(中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司, 四川 成都 610021)

摘要: 针对山区输电线路桩基础, 利用有限差分软件 FLAC^{3D} 研究斜坡地基情况下桩基础承载力与地形坡度、地质岩性、设计虚坡宽度等因素的关系。数值分析结果表明, 地形坡度越大、地质岩性越差、虚坡宽度越小时, 斜坡地基承载力安全系数越小。通过对某 ±800 kV 特高压直流工程典型直线塔和耐张塔算例的计算分析, 给出了输电线路典型岩石地基的等效 m 值的取值建议; 并考虑了地形坡度和不同耐张塔转角度数对桩基础水平承载力的不利影响, 引入 m 值折减系数 μ 供参考。

关键词: 输电线路桩基础; 数值模拟; 岩石等效 m 值; m 值折减系数; 斜坡承载力

中图分类号: TM753 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2020)04-0061-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2020.04.014

Research on Pile Foundation Design of Transmission Line in Slope Terrain

Chen Junfan, Jiang Rui, Huang Xing, Han Dagang, Yang Yang

(Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group,
Chengdu 610021, Sichuan, China)

Abstract: Aiming at the pile foundation of transmission lines in mountainous area, the relationship between the bearing capacity of pile foundation and the factors of topographic slope, geology and lithology, width of design virtual slope in slope terrain are studied by using FLAC^{3D}. Numerical analysis results indicate that, the larger the topographic slope, the worse the geological lithology and the smaller the width of virtual slope, the smaller the safety factor of the bearing capacity of slope foundation. Through the example analysis of typical suspension towers and tension towers of a ±800 kV UHVDC project, the equivalent m value of typical rock foundation is proposed. With the introduction of reduction factor μ for m value method, the adverse effects of topographic slope and different angle of tension tower on the horizontal bearing capacity of pile foundation are also considered, which is provided to designers for reference.

Key words: pile foundation of transmission line; numerical analysis; the equivalent m value of rock foundation; reduction factor of m value method; bearing capacity of the slope

0 引言

山区输电线路大量塔基位于 $25^\circ \sim 45^\circ$ 的高陡斜坡上, 受地形坡度、地质情况、交通运输及施工等多方面因素制约, 桩基础成为山区输电线路中最常采用的基础型式^[1]。但在现行输电线路基础设计中, JGJ 94—2008《建筑桩基技术规范》^[2] 和 DL/T 5219—2014《架空输电线路基础设计技术规程》^[3] 等规范的计算理论均建立在场平地地基的假定上, 对于斜坡地基桩基础设计并无完善的理论。

国内外学者对于斜坡地基承载力已有了一定的研究。加拿大学者迈耶霍夫^[4] 在平地地基极限承载力理论公式的基础上, 首次推导出斜坡地基承载力理论公式。美国学者鲍尔斯^[5] 提出用面积比折减法来修正承载力系数。日本学者加井正召^[6] 建议用极限分析法研究斜坡地基的极限承载力。中国学者顾慰慈^[7] 推导出倾斜荷载作用下的层状地基的极限承载力的近似计算公式。徐守国^[8] 用土体抗剪强度发挥系数 m 推导了坡顶距为零的临坡地基和斜坡上地基的极限承载力。王年香^[9] 根据 Mohr - Coulomb 屈服准则推导了半无限土坡在坡顶

表 1 几种典型岩石物理力学参数及其等效 m 值

岩性类别	岩土名称	岩石风化程度	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	饱和单轴抗压强度 f_{tk}/MPa	等效 $m/(\text{MN} \cdot \text{m}^{-4})$	
						$v_b = 6 \text{ mm}$	$v_b = 10 \text{ mm}$
软质岩石	泥岩	强风化	25 ~ 35	15 ~ 25		9167 ~ 22 500	5500 ~ 13 500
		中风化	80 ~ 120	25 ~ 35	5 ~ 10	30 000 ~ 55 000	18 000 ~ 33 000
	泥质砂岩	强风化	25 ~ 35	15 ~ 25		9 167 ~ 22 500	5 500 ~ 13 500
		中风化	100 ~ 140	25 ~ 35	10 ~ 20	33 333 ~ 58 333	20 000 ~ 35 000
硬质岩石	灰岩、白云岩	强风化	50 ~ 80	25 ~ 35		25 000 ~ 48 333	15 000 ~ 29 000
		中风化	180 ~ 220	35 ~ 40	30 ~ 40	65 000 ~ 83 333	39 000 ~ 50 000

注: 在 JGJ 94—2008《建筑桩基技术规范》5.7.3 中有说明, 桩顶的水平位移允许值, 当以位移控制时, 可取 10 mm(对水平位移敏感的结构取 6 mm)。

竖向荷载作用下的应力计算公式。

在目前输电线路桩基础设计中各设计院广泛采用摩擦桩计算模型, 需通过土的水平反力系数的比例系数 m 计算水平位移。对于山区输电线路桩基础设计, 常常具有地形坡度陡、桩顶距地面高度大的特点, 水平承载力及位移成为影响桩基础设计的控制条件。现行各类规范^[10-16]中并未明确给出岩石地基的水平反力系数的比例系数 m 的取值建议, 因此设计时对于水平位移验算时的 m 取值仍存在较大争议。以往工程多凭借经验假定, 并采取相对保守的设计值。在业主对设计管理、要求越来越细致, 对工程经济性、安全性要求越来越高的情况下, 有必要对斜坡地形桩基础进行较为系统的研究和分析, 提出合理的设计应对策略。

下面通过有限差分软件 FLAC^{3D} 进行数值模拟, 分析斜坡地基承载力影响要素, 并针对某 ±800 kV 特高压直流工程典型直线塔和耐张塔进行算例分析, 提出了典型岩石地基的等效 m 的取值建议, 为山区输电线路工程桩基础设计提供参考。

1 岩石地基等效 m 取值建议

针对山区输电线路“上土下岩”的地质情况, 为便于实际工程应用, 提出岩石等效水平反力系数的比例系数 m 的概念(简称等效 m), 参考 JGJ 120—2012《建筑基坑支护技术规程》^[18] 中 4.16 节, 对于无试验或缺少当地经验时的经验公式(式(1)), 利用岩石的黏聚力 c 和内摩擦角 φ 测算了几种典型岩石地基的等效 m 值, 详见表 1。

$$m = \frac{0.2\varphi^2 - \varphi + c}{v_b} \quad (1)$$

式中: m 为水平反力系数的比例系数, MN/m^4 ; c 为

黏聚力, kPa ; φ 为内摩擦角 ($^\circ$); v_b 为桩基础地面处位移量, 按地区经验取值, mm 。

对于山区输电线路桩基础设计, 由于地形坡度陡、桩顶距地面高度大的特点, 设计时应兼顾经济性, 不宜由桩基础地面处水平位移作为控制条件, 建议取值时应结合工程情况测算后确定。通过对某 ±800 kV 特高压直流工程典型直线塔和耐张塔进行算例分析发现, 当按表 2 中推荐的等效 m 取值时, 能够满足绝大部分桩基础地面位移为 10 mm 的限值, 供工程设计参考。

表 2 几种典型岩石的等效 m 工程推荐值

岩性类别	岩土名称	岩石风化程度	等效 $m/(\text{MN} \cdot \text{m}^{-4})$
软质	泥(页)岩	强风化	21 000
		中风化	35 000
	泥质砂岩	强风化	21 000
		中风化	40 000
硬质	灰岩、白云岩	强风化	39 000
		中风化	77 000

2 斜坡地形承载力影响因素

利用有限差分软件 FLAC^{3D}, 建模研究了在斜坡地基上桩基础承载力的影响因素, 主要对工程设计最为关心的地形坡度、地质岩性和设计虚坡宽度(基础外缘至坡顶的水平距离)进行了参数化分析。

2.1 分析模型

从对研究问题的分析及计算收敛性考虑, 采用带坡脚平台的斜坡模型。模型基本几何参数如图 1 所示。

模拟软件采用岩土工程通用软件 FLAC^{3D} 进行分析, 为了节省计算时间, 取 1/2 模型进行计算, 整体模型 X 方向长 32 m, Y 方向长 8 m, Z 方向高 20 m, 模型中桩径 1.6 m, 埋深 8.0 m。桩、土(岩)之间设置一

层接触面,采用接触面单元模拟桩基础与地基土(岩)的界面力学行为。网格划分及接触面设置如图2所示。

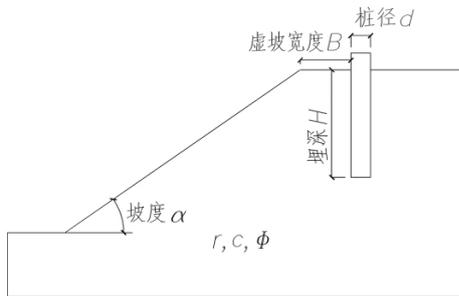
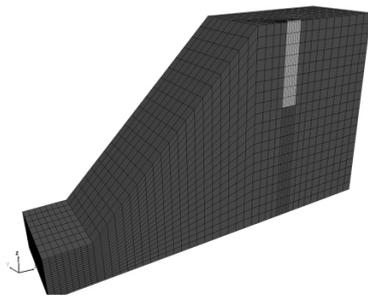
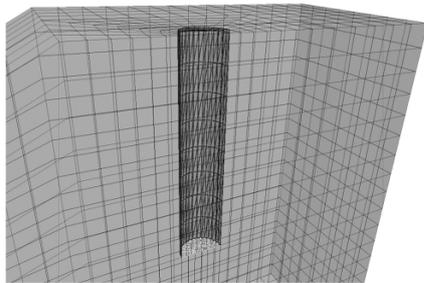


图1 带坡脚平台的斜坡模型



(a) 斜坡地基网格划分



(b) 桩、土(岩)之间接触面单元

图2 模型网格划分

2.2 参数选择

模拟计算中不考虑桩体本身的破坏,选用弹性本构模型。斜坡地基选用摩尔-库仑本构模型,其中桩和土(岩)之间设置一层接触面,模型采用的土、岩石、桩力学参数如表3所示。

表3 材料力学参数

类别	重度 γ /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹模 E /MPa	泊松比 ν	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 φ /($^\circ$)
黏性土	18	10	0.33	30	16
强风化软质岩石	21	20 000	0.35	30	20
中风化硬质岩石	25	60 000	0.25	250	50
桩	25	28 000	0.20	5000	55

根据表3中地基土(岩)和桩的材料力学参数,

估算得到其体积模量 K 和剪切模量 G ,如表4所示。接触单元材料参数如表5所示。

表4 地基土(岩)体和桩基础的体积模量 K 和剪切模量 G

土(岩)类别	体积模量 K /($\text{MN} \cdot \text{m}^{-2}$)	剪切模量 G /($\text{MN} \cdot \text{m}^{-2}$)
黏性土	9.8	3.8
强风化软质岩石	2.2×10^4	7.4×10^3
中风化硬质岩石	4.0×10^4	2.4×10^4
桩	1.6×10^4	1.1×10^4

表5 接触单元材料力学参数

类别	法向刚度 k_n /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	切向刚度 k_s /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 φ /($^\circ$)
接触单元1 (桩与黏性土)	1.0×10^6	1.0×10^6	30	10
接触单元2 (桩与强风化软质岩石)	2.3×10^9	2.3×10^9	30	14
接触单元3 (桩与中风化硬质岩石)	5.0×10^9	5.0×10^9	250	35

2.3 荷载及边界条件

计算中采用边坡强度折减法^[17]研究斜坡地基承载力,选取实际工程铁塔基础作用力加载于桩顶处,取最大竖向荷载为2600 kN、最大水平向荷载370 kN进行计算。

边界条件为横向左右边界 X 方向约束,纵向前后边界 Y 方向约束,底边界全约束,重力加速度取 10 m/s^2 。

2.4 模拟工况

考虑在实际输电线路工程中,通常斜坡塔位选择在山脊或山顶等处,地质情况较为单一,为简化数值模拟工况,假定各模拟工况中斜坡地地质从上至下均为同一土体或岩体。对地形坡度、地质岩性、虚坡宽度等工程设计最为关心的因素进行参数化分析,如表6所示。

表6 模拟工况

模拟工况	地质岩性	地形坡度/($^\circ$)	虚坡宽度
工况1	黏性土	25 30 35 40 45	1d 1.5d 2d 2.5d 3d
工况2	强风化软质岩石	25 30 35 40 45	1d 1.5d 2d 2.5d 3d
工况3	中风化硬质岩石	25 30 35 40 45	1d 1.5d 2d 2.5d 3d

2.5 模拟结果

通过计算各自工况下斜坡地基承载力安全系数,研究地形坡度、地质岩性、虚坡宽度等因素对斜坡承载力的影响。为便于后续分析,引入 m 值折减系数 μ , 定义为

$$\mu = \frac{m_i}{m_0} \quad (2)$$

式中: m_i 为考虑地形坡度、长期水平荷载等不利影响后的水平抗力系数的比例系数; m_0 为未考虑任何不利影响的水平抗力系数的比例系数。

1) 地形坡度的影响

为研究地形坡度对斜坡承载力的影响,按实际工程设计经验取虚坡宽度为 $2d$ 时进行数值分析。从图3可以看出,当虚坡宽度一定时,硬质岩地质的承载力明显高于软质岩和黏性土地质,但三者的地基承载力安全系数均随地形坡度的增大而减小,地形坡度每增大 5° ,黏性土地基承载力安全系数降低约 $1\% \sim 3\%$,软质岩地基承载力安全系数降低约 $3\% \sim 6\%$,硬质岩地基承载力安全系数降低约 $4\% \sim 9\%$ 。

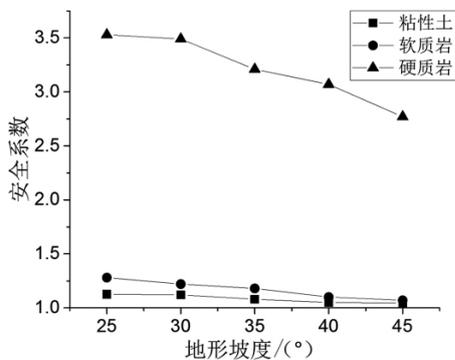


图3 地形坡度与斜坡安全系数的关系

因此,桩侧土水平反力系数的比例系数 m 的取值应考虑地形坡度对水平承载力和位移的不利影响,其 m 值折减系数 μ_1 与地形坡度的关系,可按表7取值。

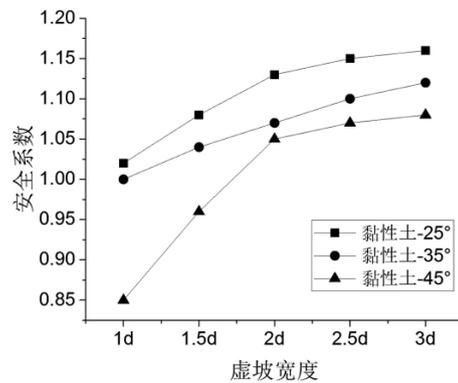
表7 地形坡度与 m 值折减系数 μ_1 的关系

地形坡度 / (°)	m 值折减系数 μ_1		
	黏性土	软质岩石	硬质岩石
0 ~ <20	1.00	1.00	1.00
20 ~ <30	0.94	0.88	0.83
30 ~ <40	0.89	0.78	0.69
40 ~ <50	0.83	0.69	0.57

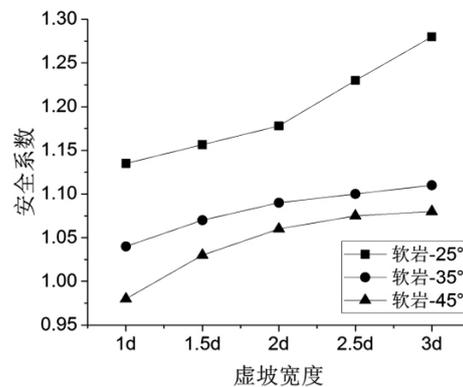
2) 虚坡宽度的影响

为研究虚坡宽度对斜坡承载力的影响,整理了

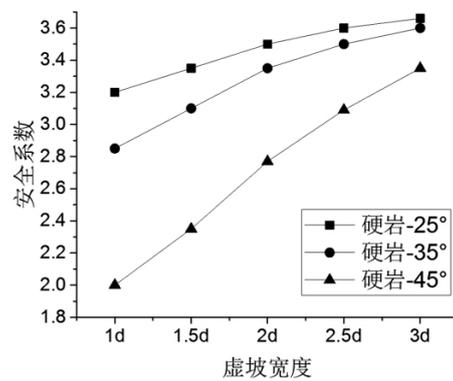
不同虚坡宽度下的斜坡承载力安全系数,如图4所示。从图4中可以看出,在不同岩性下,安全系数随虚坡宽度的变化规律较为一致,随着虚坡宽度的增大,承载力安全系数不断增大;随着地形坡度的增加,曲线的斜率略有增大。



(a) 黏性土地基虚坡宽度的影响



(b) 强风化软岩地基虚坡宽度的影响



(c) 中风化硬岩地基虚坡宽度的影响

图4 虚坡宽度与斜坡安全系数的关系

3 长期水平荷载作用对水平承载力的影响

在 DL/T 5219—2014《架空输电线路基础设计技术规程》第9.6.3注释中说明,当水平荷载为长

期或经常出现的荷载时,应将规范推荐的 m 值取值乘以 0.4 降低采用。同时,在 JGJ 94—2008《建筑桩基技术规范》5.7.5 条文说明中明确指出: m 值对于同一根桩并非定值,与水平荷载呈非线性关系,低荷载水平下 m 值较高;随荷载增加,桩侧土的塑性区逐渐扩展而降低。因此 m 取值应与实际荷载、允许位移相适应,可按式(3)进行计算:

$$m = \frac{\left(\frac{H_{cr}}{x_{cr}}v_x\right)^{5/3}}{b_0(EI)^{2/3}} \quad (3)$$

式中: H_{cr} 为临界水平荷载; x_{cr} 为临界水平荷载下对应的地面处水平位移; v_x 为桩顶水平位移系数; b_0 为桩身计算宽度; EI 为桩身抗弯刚度。

在输电线路杆塔设计中,耐张塔的水平荷载显著大于直线塔,主要包含了线条张力荷载及横向风荷载。其中线条张力荷载应视作长期或经常出现的荷载,在同样的水平位移限值情况下,建议需对耐张塔的 m 值进行折减。随着耐张塔转角度数增大,水平荷载中线条张力荷载占比也逐渐增大。通过对某 ± 800 kV 特高压直流工程 1~4 型耐张塔进行测算,整理了耐张塔转角度数和线条张力占比的关系及其 m 值折减系数与耐张塔转角度数的关系,详见表 8。

表 8 耐张塔转角度数与 m 值折减系数 μ_2 的关系

耐张塔转角度数/(°)	线条张力占比	折减系数 μ_2
0 ~ <20(1型)	0.38	0.85
20 ~ <40(2型)	0.51	0.80
40 ~ <60(3型)	0.66	0.75
60 ~ <90(4型)	0.85	0.65
90	1.00	0.40

4 结 语

针对山区输电线路桩基础设计特点,提出了岩石地基等效 m 的工程取值建议,通过数值模拟参数化分析及工程算例研究了桩基础斜坡地基承载力与地形坡度、地质岩性、设计虚坡宽度等因素的关系,主要结论有:

1) 当设计虚坡宽度一定时,斜坡地基承载力安全系数随地形坡度的增大而减小,地形坡度每增大 5° ,黏性土地基承载力安全系数降低约 $1\% \sim 3\%$,软质岩地基承载力安全系数降低约 $3\% \sim 7\%$,硬质岩地基承载力安全系数降低约 $4\% \sim 10\%$ 。

2) 当虚坡宽度一定时,斜坡地基承载力安全系

数与地质岩性相关敏感性较大,其值会随着地基黏聚力 c 和内摩擦角 φ 的增加有明显的提高。对于山区输电线路中的陡坡塔位,宜对地质条件提出更高的要求。

3) 在不同岩性下,安全系数随虚坡宽度的变化规律较为一致,随着设计虚坡宽度的增大,承载力安全系数不断增大。其中随着地形坡度的增加,曲线的斜率略有增大。在工程设计时,对于超过 35° 的陡坡地形,建议适当增加设计虚坡宽度。

4) 在实际工程应用中,由于塔位所在地形坡度和耐张塔长期水平荷载客观存在,建议桩基础设计时 m 值折减系数宜将两者的不利影响叠加考虑,取 $\mu = \mu_1 \times \mu_2$,计算值见表 9 所示。

表 9 考虑耐张塔转角度数和地形坡度的 m 值折减系数

地形坡度/(°)	耐张塔转角度数/(°)	m 值折减系数 μ		
		黏性土	软质岩	硬质岩
0 ~ <20	0	1.00	1.00	1.00
	>0 ~ <20	0.85	0.85	0.85
	20 ~ <40	0.80	0.80	0.80
	40 ~ <60	0.75	0.75	0.75
	60 ~ <90	0.65	0.65	0.65
20 ~ <30	0	0.94	0.88	0.83
	>0 ~ <20	0.80	0.75	0.70
	20 ~ <40	0.75	0.71	0.66
	40 ~ <60	0.71	0.66	0.62
	60 ~ <90	0.61	0.57	0.54
30 ~ <40	0	0.89	0.78	0.68
	>0 ~ <20	0.75	0.66	0.58
	20 ~ <40	0.71	0.62	0.55
	40 ~ <60	0.66	0.59	0.51
	60 ~ <90	0.58	0.51	0.45
40 ~ <50	0	0.83	0.69	0.57
	>0 ~ <20	0.71	0.59	0.48
	20 ~ <40	0.67	0.55	0.45
	40 ~ <60	0.62	0.52	0.43
	60 ~ <90	0.54	0.45	0.37

参考文献

- [1] 谢广采. ± 1100 kV 直流输电线路基础选型设计[J]. 山西建筑, 2016, 42(35): 85-86.
- [2] 建筑桩基技术规范: JGJ 94—2008[S], 2008.
- [3] 架空输电线路基础设计技术规程: DL/T 5219—2014[S], 2014.
- [4] G. G. Meyethof. The Ultimate Bearing Capacity of Foundations on Slopes[C]. Proceedings of 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1957.

(下转第 69 页)

实验对比数据,并利用 Matlab 软件输出实验结果。

2.3 实验结果分析与结论

实验对比结果如图 4 所示。

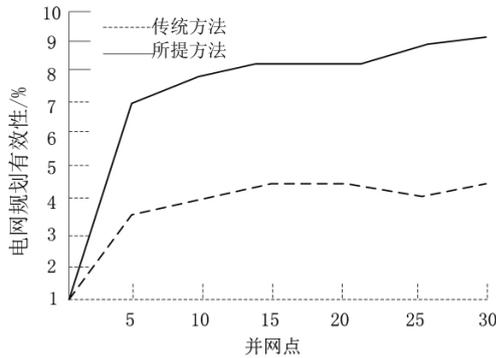


图 4 直流电网规划有效性对比

从图 4 可知,应用所设计的规划模型对直流电网进行规划,其规划有效性远高于传统方法,通过测电压偏差的实验证明在节点 6 并网可实现规划目标最优。以此证明基于风光互补的直流电网相对于传统的直流电网而言,更适用于直流电网规划,可以加快直流电网配套的新能源建设进程。

3 结 语

与采用单一发电技术的项目相比,风光互补项目可带来很多优势。在风电场增设光伏发电可以有效分摊并网及其他费用,提高项目净现值,同时在不增加弃电量情况下,使输出更稳定。此次研究不仅

从理论上证明了设计的有效性,也通过实验证明了设计的可行性。虽取得一定成果,但仍有不足之处,未来将对直流电网规划做补充性研究。

参考文献

[1] 崔勇,杨菊芳,张栋. 基于风光互补的主动电网规划模型[J]. 中国电力,2017,50(5):101-106.

[2] 文阳,周步祥,王慧,等. 基于大规模风光互补的发电侧可调节鲁棒优化调度策略[J]. 电测与仪表,2017,54(5):9-15.

[3] 李晖,高涵宇,张艳,等. 考虑相关性的大规模风光互补电网扩展规划[J]. 电网技术,2018,42(7):2120-2126.

[4] 周辉,张新松,郭晓丽,等. 基于 Copula 理论的风电出力相关性建模及在输电网规划中的应用[J]. 科学技术与工程,2018,18(4):273-278.

作者简介:

王康(1980),本科,高级工程师,主要从事电网规划研究;

戴明明(1982),本科,高级工程师,主要从事电网规划研究;

李强(1992),硕士,工程师,主要从事电网规划研究;

邓亚伟(1981),硕士,高级工程师,主要从事一次设备检修研究;

王奎红(1974),本科,高级工程师,主要从事统计与线损研究;

李志永(1984),本科,高级工程师,主要从事继电保护研究。

(收稿日期:2020-03-01)

(上接第 65 页)

[5] Joseph E B. Foundation Analysis and Design(fifth edition) [M]. McGraw - Hill Publishing ,1996.

[6] Kussakabe O. Bearing Capacity Analysis of Foundations on Slope by Use of Log - spiral Sliding Surface [J]. Soil and Foundations ,1990,30(3):678-680.

[7] 顾慰慈. 倾斜荷载作用下的层状地基的极限承载力[J]. 岩土工程学报,1984,6(1):38-51.

[8] 徐守国. 斜坡上地基承载力的研究[D]. 西安:西安公路学院:1992.

[9] 王年香,魏汝龙. 半无限土坡弹塑性应力的计算[J]. 水利水运工程学报,1999(1):1-11.

[10] 建筑地基基础设计规范:GB 5007—2011[S] 2012.

[11] 建筑地基基础设计规范:DBJ 50-047-2016[S] 2016.

[12] 建筑边坡工程技术规范:GB 50330—2002[S] 2002.

[13] 港口工程桩基规范:JTS 167-4-2012[S] 2012.

[14] 公路桥涵地基与基础设计规范:JTG 3363—2019[S] 2019.

[15] 铁路桥涵地基和基础设计规范:TB 10093—2017[S] 2017.

[16] 水电水利工程边坡设计规范:DL/T 5353—2006[S] 2007.

[17] 陈育民,徐鼎平. FLAC/FLAC3D 基础与工程实例[M]. 北京:中国水利水电出版社,2013.

[18] 建筑基坑支护规程:JGJ 120—2012[S] 2012.

作者简介:

陈俊帆(1991),工学硕士,工程师,主要研究方向为输电线路结构设计;

蒋锐(1984),工学硕士,高级工程师,主要研究方向为输电线路结构设计;

黄兴(1974),工学学士,高级工程师,主要研究方向为输电线路结构设计。

(收稿日期:2020-02-18)