

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2017.05.010

膨胀土地基输电线杆塔基础承载力特性数值模拟

吕玺琳^{1,2}, 苏征¹, 钱建固^{1,2}, 刘湘莅³

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 3. 国网河南省电力公司经济技术研究院, 河南 郑州 450052)

摘要: 基于河南南阳膨胀土不同饱和度条件下的三轴试验结果, 通过三维弹塑性有限元数值模拟, 研究了大板和台阶两种典型的杆塔基础抗压和抗拔承载特性及随着土体饱和的变化规律。结果表明, 随着膨胀土饱和度的增加, 基础的极限抗压和抗拔承载力均明显降低, 且降低速率逐渐减小。此外, 在相同埋深条件下, 大板基础的极限抗拔承载力要明显高于台阶基础。在不考虑膨胀土膨胀效应时, 饱和度增加对两种基础抗压承载力的影响程度要明显高于对其抗拔承载力的影响程度。

关键词: 膨胀土; 杆塔基础; 数值模拟; 地基承载力

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2017)05-0057-06

Simulations of the Bearing Capacity of the Transmission Tower Foundation Constructed in Expansive Soil Layer

LV Xilin^{1,2}, SU Zheng¹, Qian Jiangu^{1,2}, LIU Xiangli³

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China;

3. State Grid He'nan Economic Research Institute, Zhengzhou, He'nan 450052, China)

Abstract: Based on the results of triaxial tests of the expansive soil with different saturations in NanYang, Henan province, China. Relationship between the saturation and compression and uplift bearing capacity of plate foundation and footing foundation is studied based on three-dimensional FEM simulations. It is concluded that the compressive and uplift bearing capacity decreases obviously with saturation increases and then tend to be stable. Besides, the ultimate uplift capacity of plate foundation is much greater than that of footing foundation obviously with the same cover depth. What's more, influence of the increase of saturation on compressive bearing capacity is more visible than uplift capacity without consideration of dilatability of the soil.

Keywords: foundation of transmission tower; expansive soil; FEM; bearing capacity of foundation

膨胀土由强亲水矿物(蒙脱石、伊利石)构成,是具有吸水膨胀、失水收缩特性的高塑性黏土。我国膨胀土分布区域广泛,从河南、河北到西南部广西、云南等地,均不同程度分布着膨胀土。工程中膨胀土常具有非饱和、超固结性、裂隙发育等特性^[1]。膨胀土对环境气候条件异常敏感,浸湿后强度明显降低,从而对膨胀土地基上建、构筑物造成巨大安全隐患。

当前已有一些针对膨胀土力学特性方面的研究,包承纲等^[2]通过试验研究了南阳膨胀土的强度、

长期强度等特性。徐永福等^[3]利用可测吸力的三轴仪研究了含水率对宁夏膨胀土强度和变形特性的影响规律。卢再华等^[4]通过对南阳膨胀土进行了4种不同应力路径的三轴试验,详细研究了其在不同应力路径条件下的强度和变形特性。马少坤等^[5]建立了饱和土与非饱和土之间强度拟合公式,建立了不同饱和度条件下非饱和土强度参数转化为饱和土强度参数的拟合公式。邱雪莲等^[6]利用十八烷基三甲基氯化铵与KCl作用来改善膨胀土,根据室内试验结果可以发现,改善后的膨胀土膨胀性明显降低,水

稳定性增强。贾文聪^[7]通过三轴试验研究了安康膨胀土和汉中膨润土的强度和变形特性,得到了含水率、膨胀潜势强弱以及干湿循环次数对于膨胀土强度的影响规律。曾召田等^[8]基于室内试验,研究了干湿循环条件下膨胀土的变形规律,分析了体变参数、初始切线模量与循环次数的关系。陈伟乐^[9]通过对成都黏土和云南呈贡膨胀土研究,得到了初始含水率、初始干密度对膨胀力、膨胀率的影响规律。张旭东^[10]基于 GeoStudio 软件中的非饱和土渗流模型以及非饱和土抗剪强度的 GLE 法,研究了不同水位高度、不同填筑高度、持续蒸发及蒸发后持续降雨条件下膨胀土边坡的稳定性。袁明月等^[11]通过室内试验对比了膨胀土、素土、及不同钢渣微粉掺量的改良土,根据结果发现,钢渣微粉的掺入可以明显提高膨胀土的强度特性,并对于膨胀土干湿循环后强度降低的特性也有明显的改善效果。

与普通工、民用建筑相比,输电线路杆塔基础所受荷载复杂。一般而言,杆塔基础往往承受下压、上拔、水平等组合荷载作用。当前有关压荷载和上拔荷载条件下的承载特性开展过一些研究。如鲁先龙等^[12]根据经典土力学原理,推导了输电线路原状土基础土体滑裂面抗拔极限承载力理论计算公式。杨剑等^[13]通过数值模拟,研究了竖向和倾斜掏挖基础在不同倾斜荷载作用下的承载力特性。苏荣臻等^[14]基于现场试验对于微型桩单桩、群桩抗拔承载力特性进行了相关研究。鲁先龙等^[15]根据甘肃黄土地区掏挖基础现场抗拔试验结果,研究了其抗拔承载力特性并提出双曲线模型对试验结果进行分析。然而,有关膨胀土地基输电线路塔基础的承载力特性研究还不够系统。

本文基于膨胀土强度特性,通过弹塑性有限元数值模拟,对受压和拔荷载下输电线杆塔大板基础和台阶基础承载特性进行了研究,获得其破坏模式和极限承载力,并与规范方法计算结果进行了对比,指出现有规范方法计算结果偏保守。

1 膨胀土强度特性

绝大部分地区的膨胀土均呈非饱和状态,现阶段对于非饱和土的理论研究,大多基于 Bishop 和 Fredlund 提出的非饱和理论公式开展。Bishop^[16]提出的非饱和土抗剪强度公式为:

$$\tau_f = c' + [(\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w)] \tan \varphi' \quad (1)$$

Fredlund D G 等^[17]提出的双变量抗剪强度公式:

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \tan \varphi^b \quad (2)$$

卢肇均等^[3]提出基于膨胀土强度公式:

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan \varphi' + m p_s \tan \varphi' \quad (3)$$

对于饱和土, Mohr - Coulomb 强度准则简单实用,工程上采用广泛。非饱和膨胀土强度可分为四部分:与 c' 和 φ' 相关的部分、吸力相关部分及与膨胀力相关部分,而由膨胀力和吸力部分引起的强度又可包含在黏聚力中,作为总黏聚力的一部分,亦即:

$$c_{\text{total}} = c' + \tau_s + \tau_{ps} \quad (4)$$

式中: τ_s 为吸力引起的强度; τ_{ps} 为膨胀力引起的强度。

同样地,内摩擦角也可转换为等效内摩擦角,故非饱和膨胀土强度公式可等效为:

$$\tau_f = c_{\text{total}} + \sigma \tan \varphi_{\text{total}} \quad (5)$$

式中:强度参数 c_{total} 、 φ_{total} 可利用常规三轴试验确定。

本文基于缪林昌等^[18]对南阳膨胀土的三轴试验结果,利用式(5)得出强度参数,并据此开展输电线路杆塔基础下压和上拔极限承载力数值模拟研究。

2 杆塔基础承载力数值模拟

2.1 计算模型建立

针对远距离输电线路杆塔基础的特点,本文选取混凝土大板基础和混凝土台阶基础进行对比分析,分别其抗压和抗拔承载力。具体模型尺寸及网格划分如图 1、图 2 所示。

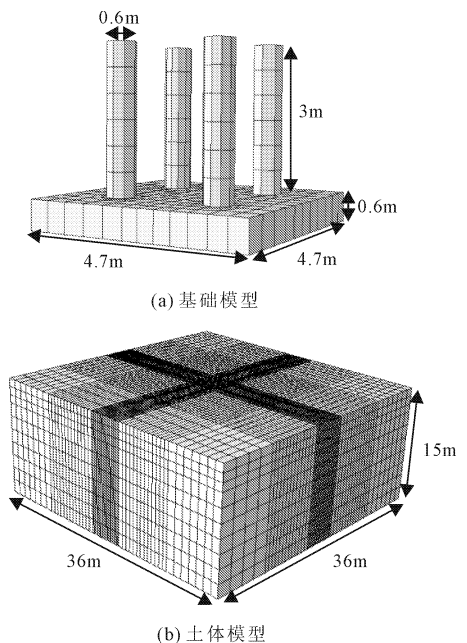


图 1 大板基础模型及网格划分

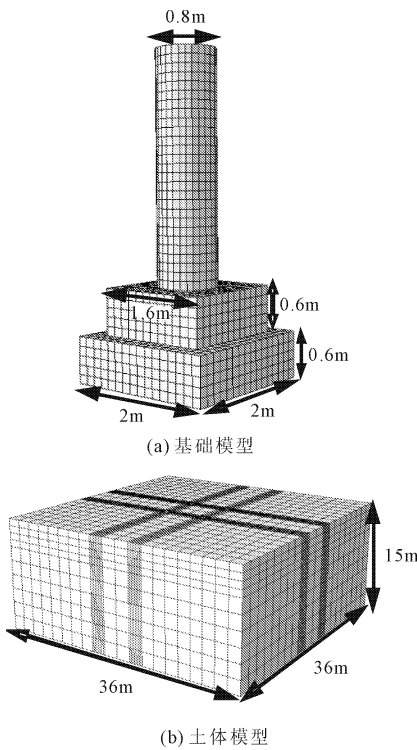


图 2 台阶基础模型及网格划分

为简化分析,模型假设:(1) 假设模型中土层为膨胀土且均匀分布,不存在分层情况;(2) 假设膨胀土服从 Mohr - Coulomb 强度准则;(3) 假设模型中土体饱和度均匀分布;(4) 假设混凝土基础为刚性体,不考虑其屈服破坏情况。

土体和基础单元类型选取三维八节点缩减积分实体单元 C3D8R,并将基础接触土体位置加密网格。设置基础与土体间的切向摩擦系数为 0.32,法向为硬接触。基于廖林昌等^[18]南阳膨胀土三轴试验结果,得到不同含水率和不同饱和度条件下膨胀土等效强度参数如表 1 所示。土体重度取 $\gamma = 18.5 \text{ kN/m}^3$,弹性模量 $E = 60 \text{ MPa}$,泊松比 $\mu = 0.26$,混凝土基础重度 $\gamma = 23.0 \text{ kN/m}^3$,弹性模量 $E = 200 \text{ GPa}$,泊松比 $\mu = 0.33$ 。

表 1 膨胀土三轴试验得到的强度参数^[18]

含水率 $\omega/\%$	饱和度 $S_r/\%$	$c_{\text{total}}/\text{kPa}$	$\varphi_{\text{total}}/(\text{°})$
17.0	59.2	115.4	29.3
20.0	69.6	78.7	22.4
23.0	80.0	55.3	21.9
26.3	92.1	41.3	21.5

2.2 抗压承载力

为较好地模拟膨胀土地基在重力荷载下的承载力,通过位移加载形式进行模拟,通过数值计算结果

得出膨胀土地基的荷载位移曲线。

台阶基础抗压承载力的计算结果如图 3 所示,台阶基础在受压时主要是对基础底部土体产生影响,土体中的应力集中区和塑性区主要产生在基础底部土体,对基础中间部位土体影响程度明显较小。

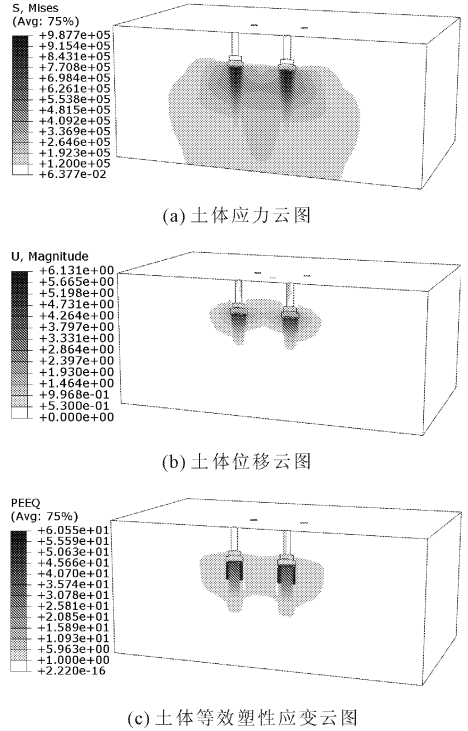


图 3 台阶基础抗压计算结果 ($S_r = 92.1\%$)

2.3 抗拔承载力

除重力荷载外,输电线路塔在运行过程中不可避免的会承受水平向风荷载或由于杆塔两端线路不均引起的侧向荷载,引起杆塔基础中产生上拔力。杆塔基础抗拔承载力对于输电线路塔安全平稳运行起着重要作用。本文通过位移加载的形式,对基础顶部施加竖直向上的位移来模拟基础的上拔作用,从而得到膨胀土地基的抗拔承载力特征值。两种基础抗拔计算结果如图 4、图 5 所示,大板基础在上拔过程中对地基土体的影响程度和范围远高于台阶基础,但台阶基础由于体型小,更容易在土体中引起局部应力集中。

3 承载力特性及破坏模式

3.1 抗压承载力及其破坏模式

台阶基础计算所得的荷载 - 位移曲线如图 6 所示,曲线表示基础中心点下部土体应力和位移关系。结果表明,台阶基础荷载位移曲线具有明显拐点,当基础底部土体屈服破坏后,基础位移明显增大而承

承载力不再增长。

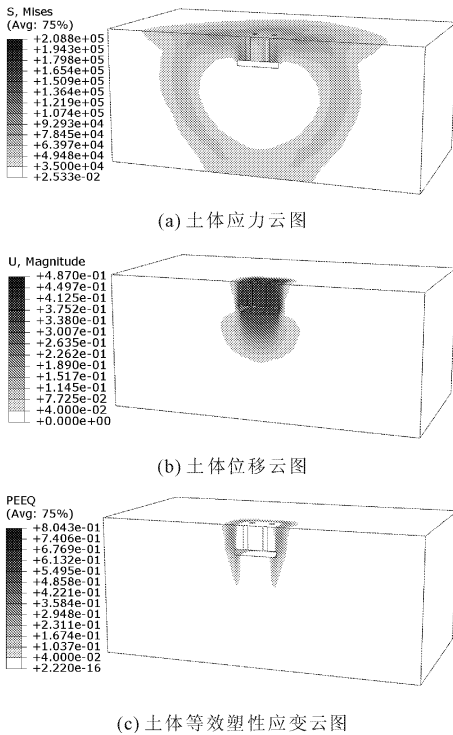


图 4 大板基础抗拔计算结果 ($S_r = 92.1\%$)

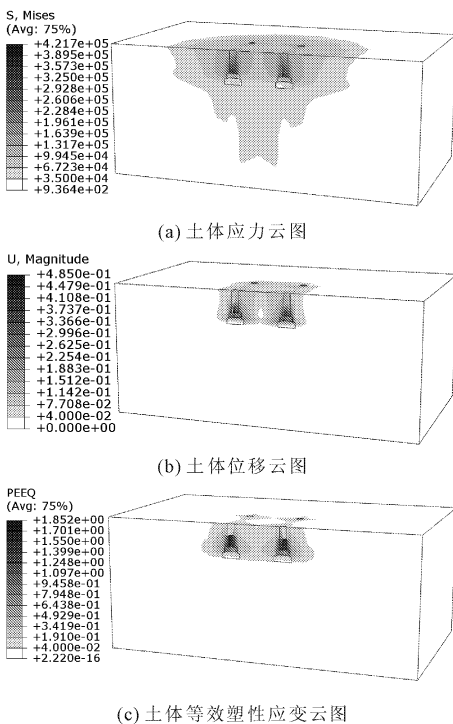


图 5 台阶基础抗拔计算结果 ($S_r = 92.1\%$)

不同饱和度地基土情况下台阶基础的极限承载力如表 2 所示,其关系曲线如图 7 所示。通过曲线可明显看出,随着饱和度增加,基础承载力明显降低,且降低程度随着饱和度增大而减小。当饱和度

从 59.2% 增加到 92.1% 时,极限承载力均降低 60% 以上。

台阶基础达到极限承载力时的位移矢量图如图 8 所示,呈现刺入剪切破坏模式,仅在基础下部局部区域发生破坏,且土体位移以竖向位移为主,地表无明显隆起。

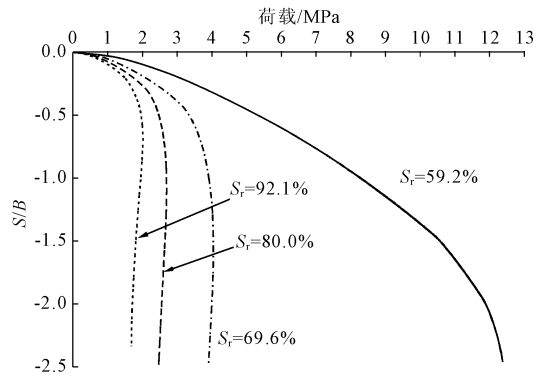


图 6 不同饱和度下台阶基础抗压承载力荷载 - 位移曲线

表 2 不同饱和度条件下台阶基础的极限承载力

饱和度/%	59.2	69.6	80.0	92.1
极限承载力/MPa	12.33	3.94	2.69	1.96

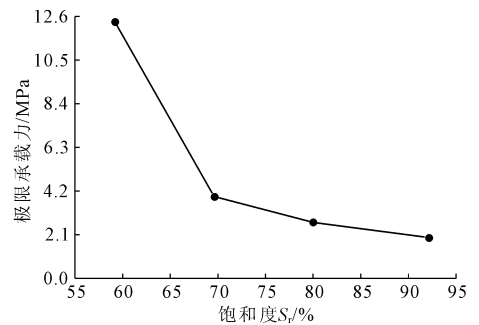


图 7 台阶基础极限承载力与饱和度之间的关系曲线

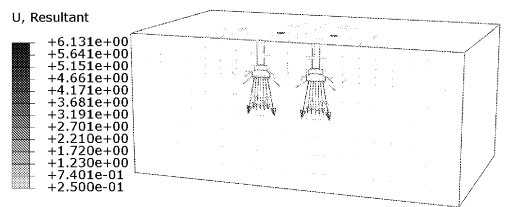


图 8 台阶基础位移矢量图 ($S_r = 92.1\%$)

3.2 抗拔承载力

两种基础抗拔时荷载 - 位移曲线如图 9 所示,对比两种基础结果可明显看出,大板基础抗拔时,随位移增大,其承载力迅速增大,直到破坏后其承载力基本不变;而台阶基础在抗拔时,其承载力发挥需较大位移,并且在土体破坏后,其承载力仍有较小程度提高。

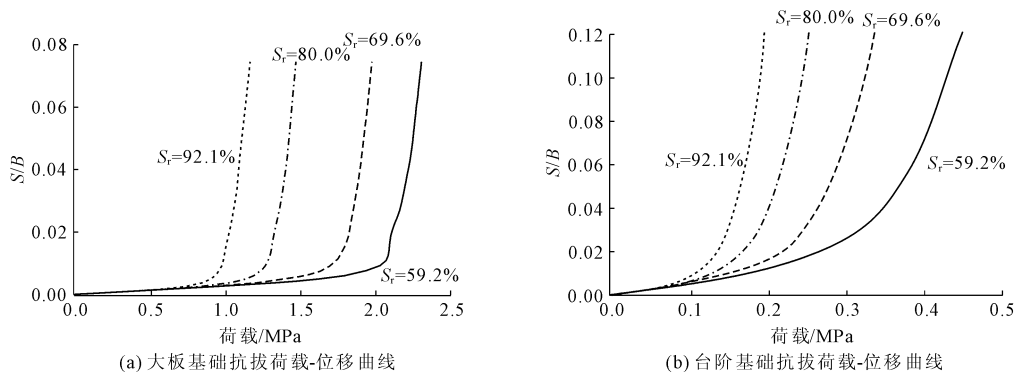


图 9 不同饱和度情况下基础的荷载位 - 移曲线

不同饱和度下两种基础极限抗拔承载力如表 3 所示,其关系曲线如图 10 所示。在相同饱和度且不考虑膨胀土膨胀条件下,台阶基础极限抗拔承载力为大板基础的 20%左右。随着饱和度增加,两种基础抗拔承载力均降低,且降低趋势基本一致。当土体饱和度从 59.2% 增加至 92.1% 时,其承载力均降低 60% 左右。

表 3 不同饱和度条件下地基土体的极限承载力

饱和度 /%	大板基础极限承载力/MPa	台阶基础极限承载力/MPa
59.2	2.09	0.33
69.6	1.77	0.24
80.0	1.25	0.17
92.1	0.96	0.13

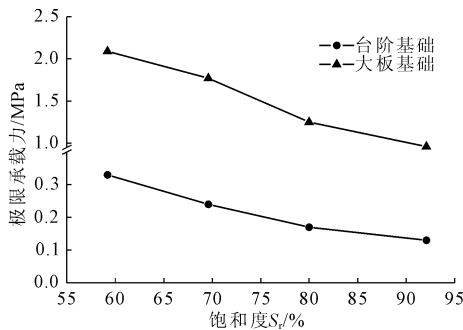


图 10 两种基础极限承载力与饱和度之间的关系曲线

两种基础抗拔破坏时土体位移矢量如图 11 所示。大板基础在抗拔过程中主要引起其上部土体竖向位移,导致地基土体产生整体剪切破坏。台阶基础则主要使基础周围土体向上部和四周移动,地表基础周围土体隆起。

3.3 台阶基础地基承载力特性

不同饱和度条件下台阶基础地基极限承载力如图 12 所示。相对于极限抗拔承载力而言,饱和度增加对地基抗压极限承载力影响程度更高,随着饱和

度增加,基础抗压承载力急剧降低,最大降幅可达 84.10%,而抗拔极限承载力最大降幅为 60.60%。另一方面,相同饱和度条件下,基础抗压承载力明显高于其抗拔承载力,不过两者之间的差距随着土体饱和度增加而减小。

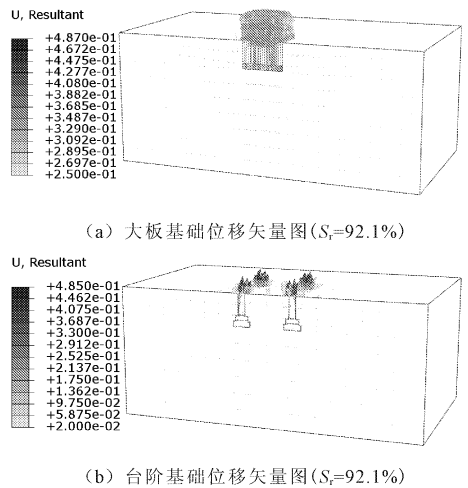


图 11 两种基础抗压承载力位移矢量图

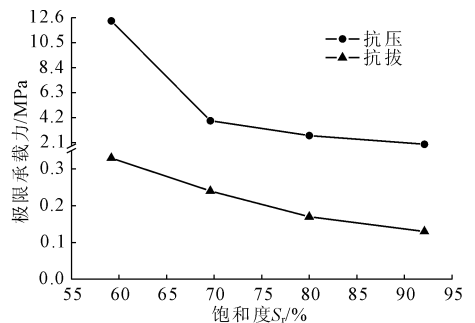


图 12 不同饱和度下台阶基础极限承载力曲线

4 结论

基于现有的南阳膨胀土试验结果进行分析获得强度参数,针对两种典型的输电线路杆塔基础抗压和抗拔承载力进行数值模拟,并分析了不同饱和度和

对其承载力的影响规律。

(1) 在抗压破坏模式方面,台阶基础呈现刺入剪切破坏模式,仅在基础下部局部区域土体发生破坏,且土体位移以竖向位移为主,地表无明显隆起现象。

(2) 在抗拔承载力方面,两种基础的承载力主要来源于基础自重及上覆土体重度。由于大板基础底面积较大,其抗拔承载力表现出明显优势,但在破坏模式方面,大板基础破坏后,其承载力将不再提高,而台阶基础的承载力仍会随着变形增大而进一步增大。

(3) 极限抗压承载力及抗拔承载力都随着土体饱和度增加而降低,且降低速率随饱和度增加而逐渐减小。当土体饱和度从 59.2% 增大到 92.1% 时,基础极限抗压和抗拔承载力可降低 60% 左右。

(4) 根据台阶基础抗压和抗拔承载力计算结果可发现,膨胀土饱和度增加对抗压极限承载力影响程度要明显高于抗拔承载力,同样饱和度条件下,抗压承载力要高于抗拔承载力,但两者差距随饱和度增加而逐渐减小。

参考文献:

- [1] 谭罗荣,孔令伟. 膨胀土的强度特性研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(7): 1009-1013.
- [2] 包承纲,刘特洪. 河南南阳膨胀土的强度特性[J]. 长江科学院院报, 1990, 7(2): 1-8.
- [3] 徐永福,陈永战,刘松玉,等. 非饱和膨胀土的三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(3): 14-18.
- [4] 卢再华,陈正汉,孙树国. 南阳膨胀土变形与强度特性的三轴试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(5): 717-723.
- [5] 马少坤,黄茂松,范秋雁. 基于饱和土总应力强度指标的非饱和土强度理论及其应用[J]. 岩石力学与工程学

报, 2009, 28(3): 635-640.

- [6] 邱雪莲,王保田. 膨胀土化学改良效果及其在边坡工程中应用的试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2013, 11(2): 190-195.
- [7] 贾文聪. 非饱和膨胀土强度与变形特性的试验研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
- [8] 曾召田,刘发标,吕海波,等. 干湿交替环境下膨胀土变形试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2015, 13(3): 72-76.
- [9] 陈伟乐. 膨胀土膨胀性与强度衰减关系的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- [10] 张旭东. 不同地下水位下考虑降雨和蒸发影响的膨胀土路堤稳定性分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(2): 212-217.
- [11] 袁明月,张福海,陈翔,等. 钢渣微粉改良膨胀土室内试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2017, 15(2): 81-85.
- [12] 鲁先龙,程永锋,张宇. 输电线路原状土基础抗拔极限承载力计算[J]. 电力建设, 2006, 27(10): 28-32.
- [13] 杨剑,高玉峰,程永锋,等. 输电线路掏挖式基础在倾斜荷载作用下的特性[J]. 工业建筑, 2008, 38(6): 62-66.
- [14] 苏荣臻,陈培,鲁先龙. 微型桩杆塔基础上拔试验研究[J]. 建筑科学, 2011, 27(11): 51-54.
- [15] 鲁先龙,乾增珍,崔强. 黄土地基掏挖扩底基础抗拔试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(3): 647-652.
- [16] W B A, Alpan. I B G E. Factors controlling the shear strength of partly saturated cohesive[Z]. University of Colorado: 1960.
- [17] Fredlund D G, Morgenstern N R, Widger R A. The shear strength of unsaturated soils[J]. Can Geotech J, 1978, 15(3): 313-321.
- [18] 缪林昌,殷宗泽,刘松玉. 非饱和膨胀土强度特性的常规三轴试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2000, 30(1): 121-125.