

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.069



索连板球基础竖向抗拔承载特性及其影响因素

王雪姣^{1,2}, 言志信², 龙哲²

(1. 三峡大学 土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 河南城建学院 土木与交通工程学院, 河南 平顶山 467036)

摘要:针对沙漠地区砂土地基的工程特性及现有输电塔基础存在的不足, 研发出索连板球基础。将室内相似模型上拔试验与数值模拟计算相结合, 对不同上拔荷载作用下的基础位移进行分析, 并研究了埋深比、球径及柱径对基础极限抗拔承载力系数及土体表面主破裂面半径的影响及其规律。研究表明: 数值模拟计算结果与模型试验结果吻合较好, 与土体变形演化的三阶段相对应, 荷载-位移曲线呈三段式变化; 埋深比对基础极限抗拔力影响最大, 且它们之间呈正相关关系; 极限抗拔承载力系数随埋深比增大呈先增大后减小的变化趋势, 与球体直径呈负相关关系, 与水泥土柱直径呈正相关关系; 土体表面主破裂面半径与埋深比、球径及柱径均呈负相关关系。

关键词:索连板球基础; 埋深比; 荷载-位移曲线; 极限抗拔承载力系数

中图分类号: TU735 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2019)04-0036-08

Vertical uplift resistance of the foundation of plate and ball connected by anchor cable and its influencing factors

Wang Xuejiao^{1,2}, Yan Zhixin², Long Zhe²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, P. R. China; 2. School of Civil and Transportation Engineering, Henan University of Urban Construction, Pingdingshan 467036, Henan, P. R. China)

Abstract: According to the engineering properties of sandy soil foundation in desert area and the shortcomings of the existing transmission tower foundation, a foundation of plate and ball connected by an anchor cable is developed. By combining the similar model uplift tests and numerical simulations, the displacement of the foundation under different uplift loads is analyzed. Besides, the influence and its rule of buried depth ratio, spherical diameter and column diameter on the ultimate uplift bearing capacity coefficient of the foundation and the radius of main rupture surface of soil surface are studied. The results show that the numerical simulation results are in good agreement with the experimental results. The load-displacement curve presents a three-stage form, which corresponds to the three stages of soil deformation evolution. The ratio of buried depth is of the greatest influence on the ultimate uplift resistance of foundation, and there is a positive correlation between them. The ultimate uplift bearing capacity coefficient increases first and then decreases with increase of burial depth ratio. It is negatively correlated

收稿日期: 2018-10-09

基金项目: 河南省科技攻关项目(162102310390); 河南省引智项目(201804)

作者简介: 王雪姣(1992-), 女, 主要从事地基基础研究, E-mail: 532708140@qq.com。

言志信(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: yzx10@163.com。

Received: 2018-10-09

Foundation item: Scientific and Technological Research Projects in Henan Province (No. 162102310390); Overseas Experts Introduction Project in Henan Province(No. 201804)

Author brief: Wang Xuejiao (1992-), main research interest: foundation engineering, E-mail: 532708140@qq.com.
Yan Zhixin (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: yzx10@163.com.

with the sphere diameter and positively correlated with the cement-soil column diameter. The radius of the main rupture surface of soil is negatively correlated with the buried depth ratio, spherical diameter and column diameter.

Keywords: foundation of plate and ball connected by anchor cable; buried depth ratio; load-displacement curve; ultimate uplift bearing capacity coefficient

随着国民经济的飞速发展,电力需求快速增长,输电线路工程建设遍布全国各地。输电塔基础是输电线路工程建设的重要组成部分,常见的输电塔基础主要有“掏挖扩底桩”基础、“大开挖”基础、爆扩桩基础等几种基础型式。鉴于上述基础型式的不足和存在的问题,殷永高等^[1]针对厚覆盖层的特性研发了根式基础;樊文伟等^[2]针对湿陷性黄土研发了中空基础;雒亿平等^[3-6]借鉴锚索拉盘、掏挖桩等技术研发了联合板索基础,并对基础极限抗拔力及基础周围土体变形演化过程进行了系统深入的研究;刘明亮等^[7]应用PIV技术进行了锚板上拔试验,得出了锚板周围土体的位移场及应变场演化规律;Sivaraman等^[8-9]通过室内模型试验及数值模拟计算,研究了不同因素下单锚与多锚基础在不同上拔力作用下的位移响应规律;Ilamparuthi等^[10]进行了圆形锚板在不同密实度砂土中的抗拔性能试验,提出了浅埋及深埋锚板在上拔力作用下的土体破坏模式;Hanna等^[11]对螺旋锚与平板锚在砂土中的抗拔性能进行研究,提出了确定临界埋深及破裂面半径的经验表达式;夏元友等^[12]通过透明土物理模型试验对连续球体锚杆极限承载力及土体扰动规律进行了研究,并提出了连续球体锚杆极限承载力公式。在砂土地基条件下,无论是传统抗拔基础,还是新型根式基础或是中空基础,均存在施工难度大、工期长且抗拔承载力有限等问题,锚板虽能提供较大抗拔力,但其施工难度仍然较大。综上所述,迄今为止,除笔者研发的索连板球基础外,仍没有能够应用于沙漠地区砂土地基的基础型式。

1 索连板球基础

索连板球基础如图1所示。索连板球基础施工技术简便成熟,开挖少,对地基土扰动小,减少了弃土量,有利于保护生态环境,尤其是填补了沙漠地区砂土地基基础型式的空白^[13]。该基础主要由水泥土柱、上板、下部球体和锚索4部分构成,亦即该新型基础主要包括:浇筑于砂土地基中的水泥土柱、嵌

入地基中的上板、埋于地基深部的下部球体和联系上板与下部球体的锚索4部分^[14]。索连板球基础的建成方法:平基并浇筑所述基础上板;利用高压旋喷技术在地基中钻孔,继而高压喷射灌浆浇筑水泥土柱;沿水泥土柱的轴线钻孔至其底,并在底部进行多次爆破扩孔,形成底部球形空腔;将下端绑扎有抗水炸药的锚索沿水泥土柱的钻孔置于底部空腔;用注浆体浇注球形空腔后引爆炸药,使锚索散开于球形空腔中,注浆体固结后,锚索底部被锚固;将其顶端与所述上板连接到一起,施加预应力于锚索后,再次用注浆体浇注底部空腔和水泥土柱中的钻孔,构建起所述索连板球基础。

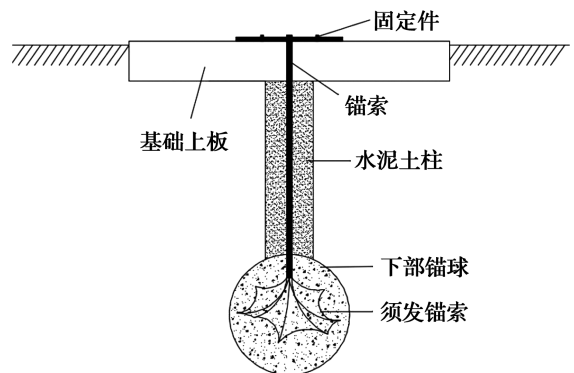


图1 基础示意图

Fig. 1 Schematic diagram of foundation

索连板球基础是一种新型基础,其抗拔特性、承载力计算、变形破坏机制及模式均缺乏理论分析与试验验证。为此,本文进行了不同埋深比、球径及柱径3个系列的相似模型上拔试验,并运用FLAC^{3D}有限差分软件进行了数值模拟分析,为该新型基础的设计施工提供理论支撑。

2 相似模型试验

由于沙漠环境恶劣,开展现场试验困难较大,因而在室内开展模型试验研究。

2.1 相似材料准备

2.1.1 地基土相似材料 结合沙漠地区砂土地基的工程特性及工程要求开展研究,地基砂土取自于

具有较好代表性的腾格里沙漠民勤县蔡旗乡,通过实地勘查,进行砂土取样和现场原位试验及室内试验,测得原状砂土的基本物理力学参数,如表 1 所示,试验中砂土及水泥土相似材料采用的相似常数见表 2。基于长度相似比为 10 的参数换算结果,并结合原状砂土物理力学性质,最终选用原状砂土作为地基土相似材料的原材料,通过控制砂土含水率及击实次数来配制地基土相似材料,最终确定地基土相似材料为含水率 14%、击实次数为 10 击的重塑砂土,其基本物理力学性质见表 3。

表 1 原状砂土物理力学性质

Table 1 Physical and mechanical properties of undisturbed sand soil

土质	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	c/MPa	E_s/MPa	$\varphi/(^\circ)$
原状砂土	1.6~1.8	0	18~23	31~35

表 2 模型试验砂土及水泥土采用的相似常数

Table 2 Similarity constants for sand and cement-soil used in model tests

L	ρ	c	φ	E_s	μ	σ	ϵ	F
10	1	10	1	10	1	10	1	1 000

表 3 地基土相似材料物理力学性质

Table 3 Physical and mechanical properties of similar materials of foundation soil

土质	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	c/MPa	E_s/MPa	$\varphi/(^\circ)$
重塑砂土	1.7~1.75	0	1.9~2.2	31~35

2.1.2 水泥土相似材料 由于索连板球基础需要应用于沙漠地区砂土地基中,基础中水泥土柱构筑的地基条件为沙漠砂土,查阅水泥土相关文献,获得沙漠砂土地基条件下水泥土的物理力学参数,见表 4。可依据物理力学参数和相似比,确定水泥土相似材料的物理力学参数,继而采用标准砂、重晶石、滑石粉等按照重量比配制水泥土相似材料,通过大量的相似材料配比试验及试验结果的分析,最终获得了符合试验要求的水泥土相似材料配比,如表 5 所示,配置的水泥土相似材料物理力学参数见表 6。

表 4 水泥土物理力学性质

Table 4 Physical and mechanical properties of cement-soil

土质	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	c/MPa	E_c/GPa	$\varphi/(^\circ)$	f_{cu}/MPa
水泥土	1.7~1.8	0.1~1.0	0.01~0.07	20~30	5~15

表 5 水泥土相似材料配比

Table 5 Mix ratio of cement-soil similar materials %

编号	标准砂	重晶石	滑石粉	石膏	硅藻土	水泥	水
1	29.0	15.0	3.9	9.0	8.7	7.3	27.1

表 6 水泥土相似材料物理力学性质

Table 6 Physical and mechanical properties of cement-soil similar materials

土质	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	c/kPa	E_c/MPa	$\varphi/(^\circ)$	f_{cu}/MPa
水泥土相似材料	1.7~1.8	67.8	69.2	20~30	0.5~1.5

2.2 模型制作

根据沙漠地区砂土地基勘察分析以及工程经验可知,原型基础不会超出面积 $10 m \times 10 m$ 、深度为 5 m 的影响范围,因而,确定模型试验的相似比为 10,由此确定模型箱的尺寸为 $1 m \times 1 m \times 0.8 m$ (长 \times 宽 \times 高)。模型箱由角钢和 4 mm 厚的钢板焊接制成,并采用槽钢焊于箱体四周,以抑制模型箱因侧向土压力而产生的变形,模型箱示意图如图 2 所示,实景图如图 3 所示。

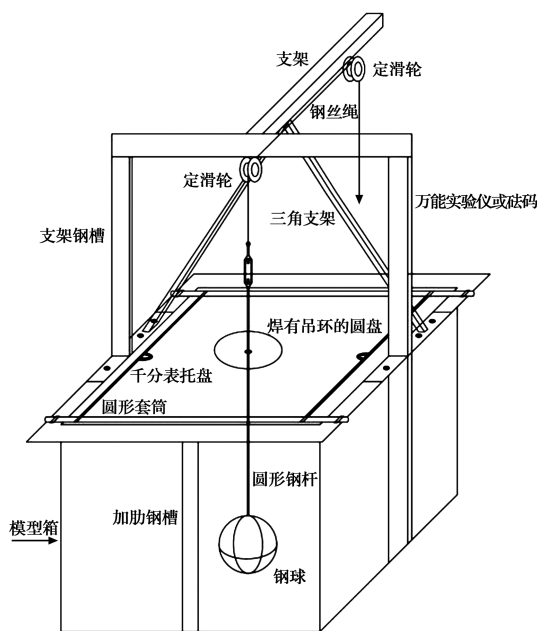


图 2 模型箱示意图

Fig. 2 Schematic diagram of model box

为确保试验中砂土相似材料的含水率满足试验要求,需先称取一定量过筛后的干砂,将其倒入搅拌机内搅拌,且边搅拌边洒水加水,使干砂在拌和过程中得到均匀湿润,然后,测定拌和湿润后砂土的含水率,测得含水率约为 14% 时,可将其铺设到模型箱内,作为相似模型试验的地基。同时,由于钢球和圆

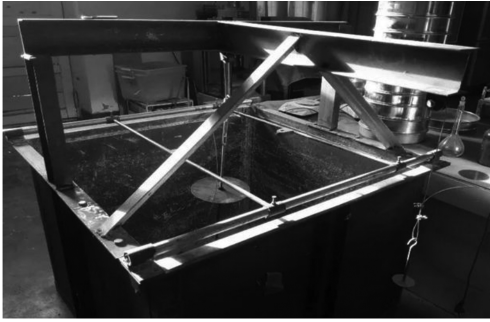


图3 模型箱实景图

Fig. 3 Real scene picture of model box

钢杆的变形很小,可将它们连在一起,分别作为相似模型试验中索连板球基础的下部球体和竖向锚索,并在圆钢杆外套圆管,且所套圆管的轴线与圆钢杆重合,那么圆管的内空可用来构筑水泥土柱相似模型。由于相似模型试验针对基础抗拔承载性能及其影响因素进行研究,因而竖向抗拔相似模型试验中,基础模型制作可不考虑基础上板。在模型箱的中心位置安置好基础模型及所述圆管后,即可采用分层夯实的方法铺设拌和湿润后的砂土,从而构筑起相似模型试验的地基及基础。

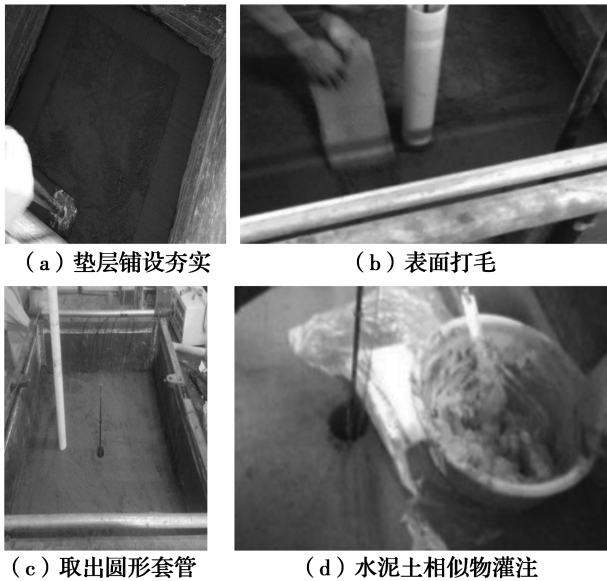


图4 模型制作

Fig. 4 Model making

2.3 试验方案

基于索连板球基础抗拔性能的主要影响因素为埋深比、球径及水泥土柱直径,相应制定了3个系列的试验方案,方案编号及基础模型尺寸见表7,其中,第1系列包含1、2、3号方案,第2系列包含1、4、5号方案,第3系列包含1、6、7号方案。

表7 试验方案

Table 7 The scheme of test

编号	埋深比 H/D	球体直径 D/cm	埋深 H/cm	水泥土柱直径 d/cm
1	1	15	15	6
2	2	15	30	6
3	3	15	45	6
4	1	12	12	6
5	1	18	18	6
6	1	15	15	8
7	1	15	15	10

2.4 试验加载与监测

试验加载装置主要由砝码盘、钢绞线、定滑轮、槽钢支架及花兰组成。加载装置安装过程如下:首先,将特制的圆形薄钢板固定于螺纹圆钢杆上;然后,将钢绞线一端通过花兰连接螺纹圆钢杆,另一端绕过固定于槽钢支架上的定滑轮并连接砝码盘悬挂于箱体外;最后,通过改变砝码量来改变上拔荷载进行试验加载。由于球体埋置于土体内,其位移无法直接测取,因而试验中将千分表一端放置于连接螺纹圆钢杆(其变形可忽略不计)的特制圆钢板上,另一端与固定于模型箱边框上的磁性表座连接,通过测取螺纹圆钢杆位移间接测取球体位移,如图5所示。

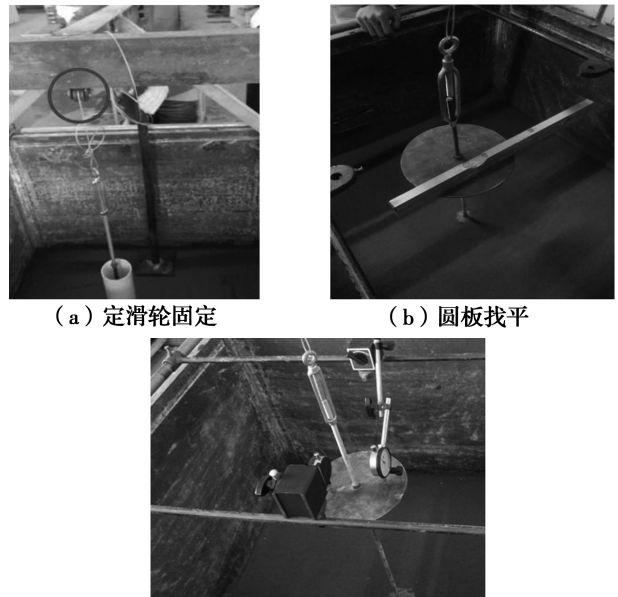


图5 设备架设

Fig. 5 Equipment erection

试验采用分级加载的方式,通过圆钢杆对下部球体施加上拔力,为使试验加载合理,先通过数值模拟对基础极限上拔力进行预估,而后取每级分荷载值为预估极限上拔力的1/8,每级荷载作用下,基础

位移 1 h 以内不超过 0.01 mm,且连续出现两次,即视为稳定,记录此时千分表读数及所施加荷载量,之后,方可施加下一级荷载。若地表出现裂缝或本级荷载产生的位移是上级荷载产生位移的 5 倍,可认为基础失效,此时,荷载为极限上拔荷载;若 8 级加载完成,仍未破坏,可按照分级加载量继续施加,直至基础失效。

2.5 试验结果

2.5.1 荷载-位移曲线特性 在对 7 组不同尺寸的基础模型进行室内相似模型上拔试验后,分析其不同上拔力作用下基础位移的变化,并将试验中记录的荷载及其对应位移绘制成荷载-位移曲线,如图 6 所示。

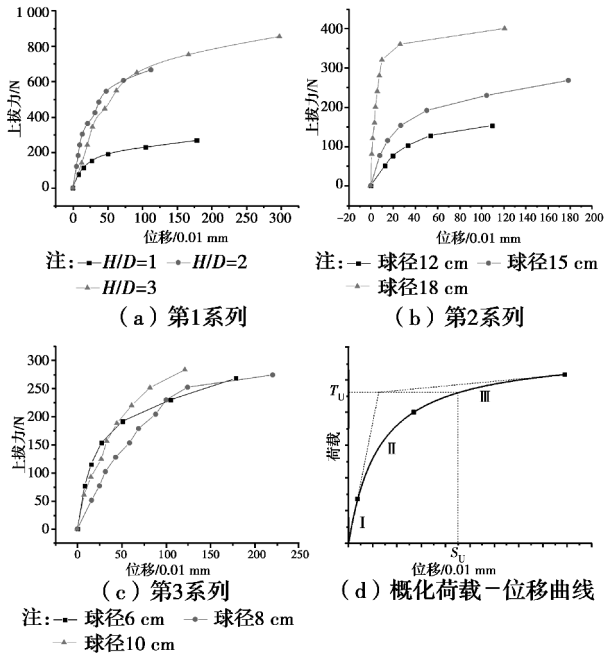


图 6 荷载-位移曲线

Fig. 6 Load-displacement curves

由图 6 可见,不同系列荷载-位移曲线发展趋势一致,均呈线性增长→平缓→趋于水平的三段式变化,可概化为图 6(d)所示的荷载-位移曲线,对应土体上拔过程中的 3 个变化阶段:

初始阶段(I),即弹性阶段,上拔力较小,上拔力主要用于克服水泥土柱柱侧摩阻力与基础自重,此阶段,位移增速缓慢,随着上拔力的增大,土体在球体的挤压作用下产生压缩变形,荷载-位移曲线呈线性增长。

发展阶段(II),即弹塑性过渡阶段,随着上拔力的进一步增大,球体与土体发生剪切作用,球体之上的土体发生剪切破坏,继而破坏区域向斜向上扩展,土体在球体的作用下变形压缩,位移增速明显增大,曲线趋于平缓。

破坏阶段(III),上拔力继续增大,破坏区逐渐发展至土体上表面,即地面,少量荷载增加引起位移显著增大并伴随土体表面隆起,曲线趋于水平,可认为达到极限上拔荷载。

此外,由图 6 还可看出,极限上拔荷载与埋深比、球径、柱径均呈正相关关系,并且极限上拔荷载随埋深比的变化幅度大于其在球径影响下的变化幅度,但随着柱径的改变,极限上拔荷载没有产生明显变化,由此可见,3 个影响因素对极限上拔荷载的影响由大到小依次为:埋深比、球径、柱径。

2.5.2 极限抗拔承载力系数 极限抗拔承载力系数可以很好地反映锚板的抗拔承载特性,在进行砂土地基中球体抗拔研究时,极限抗拔承载力系数也是一项重要的评价指标^[15]。砂土中极限抗拔承载力系数 N_c 计算公式为

$$N_c = \frac{T_U}{A\gamma h} \quad (1)$$

式中: T_U 为极限抗拔承载力; A 为球体与土体接触的上表面面积; γ 为土体重度; h 为基础埋深。

利用式(1)分别计算 7 组试验模型的极限抗拔承载力系数,计算结果与埋深比、球径、柱径的关系曲线如图 7 所示。由图 7(a)可看出,球体与土体接触面积不变时,极限抗拔承载力系数随埋深比先增大后减小,并且在埋深比为 2 时达到峰值,此时,基础承载效率最高。由图 7(b)、(c)可看出,极限抗拔承载力系数与球体直径呈负相关关系,与水泥土柱直径呈正相关关系。

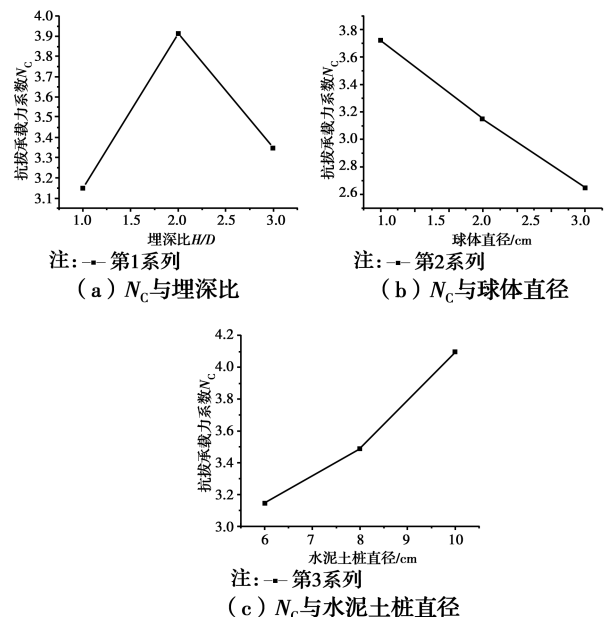


图 7 极限抗拔承载力系数变化曲线

Fig. 7 Variation curves of ultimate uplift bearing capacity coefficient

2.5.3 土体表面破坏 随着上拔力的增大,基础位移不断增大,土体表面会出现环向和径向裂缝,且裂缝随着上拔力逐渐接近极限承载力而逐渐增多,当上拔力达到极限抗拔承载力时,基础位移突增并伴随水泥土柱周围土体隆起,土体表面出现以水泥土柱为中心的环向裂缝,形成圆形破裂面,同时,在破裂面内外出现不连续的次级裂缝,如图8所示。对主破裂面半径进行测量并记录,其与埋深比、球径及柱径的关系曲线如图9所示。图9中曲线变化趋势一致,土体表面主破裂面半径与埋深比、球径、柱径均呈负相关关系。



图8 土体表面破坏图

Fig. 8 Surface failure diagram of soil

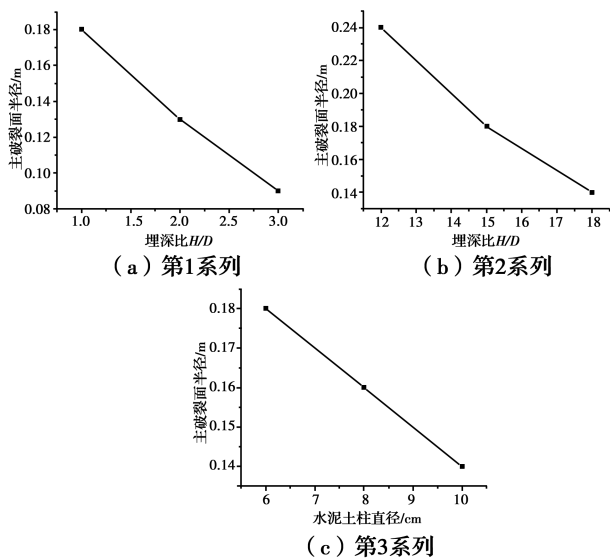


图9 主破裂面半径变化曲线

Fig. 9 Radius variation curves of main fracture surface

3 数值模拟计算

由于索连板球基础是一种新的基础型式,笔者不仅利用相似模型试验对其抗拔承载力、位移及地基主破裂面半径进行了研究,同时,对相似模型试验的上拔过程进行了模拟计算,并将数值模拟结果与试验结果进行对比分析。

3.1 基础模型的建立

利用 FLAC^{3D} 建立数值计算模型,并对柱体与球体交接处进行优化,使其更接近试验模型,采用内置的六面体隧道外围渐变放射网格建立土体模型,并且随着与基础距离的增大,网格尺寸以 1.1 比率逐渐增大,典型的模型网格划分如图 10 所示。将地基土体作为弹塑性材料,遵从 Mohr-Coulomb 屈服准则,数值计算所采用的地基土物理力学参数均通过现场取样测试,然后按相似比换算而来。理论上,砂土的黏聚力为 0,但水的表面张力致使其存在假黏聚力,测得原状砂土假黏聚力为 1.25~12.5 kPa,故数值计算中土体黏聚力取值为 1.25 kPa,数值模拟计算参数见表 8。

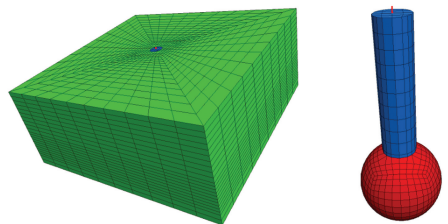


图10 地基土及基础模型网格划分图

Fig. 10 Grid division diagram of foundation soil and foundation model

表8 数值模拟计算参数

Table 8 Numerical simulation calculation parameters

名称	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	黏聚力/ /kPa	泊松比	弹性模量/ MPa
重塑砂土	17.5	35	1.25	0.38	2.0
水泥土	18.0	30	67.8	0.22	69.2
混凝土	25.0			0.20	3×10^3

3.2 计算结果分析

基于相似模型试验方案,对基础上拔过程进行数值模拟计算,试验与数值模拟所得荷载-位移曲线的对比如图 11 所示。

由图 11 可以看出,试验与数值模拟结果具有较好的一致性,但加载后期上拔力较大时,数值模拟位移值明显大于试验位移值。原因可能是:1)数值模拟中,地基土视为均质,而模型试验采用分层夯实地基土,土体的物理力学性能存在分层现象;2)仪表读数误差、人工操作误差等都可能使试验结果与数值计算结果产生偏差;3)试验中,当地表出现裂缝或此级荷载产生位移是上级荷载产生位移的 5 倍时,即认为已达基础承载极限,而数值模拟计算中,在地表

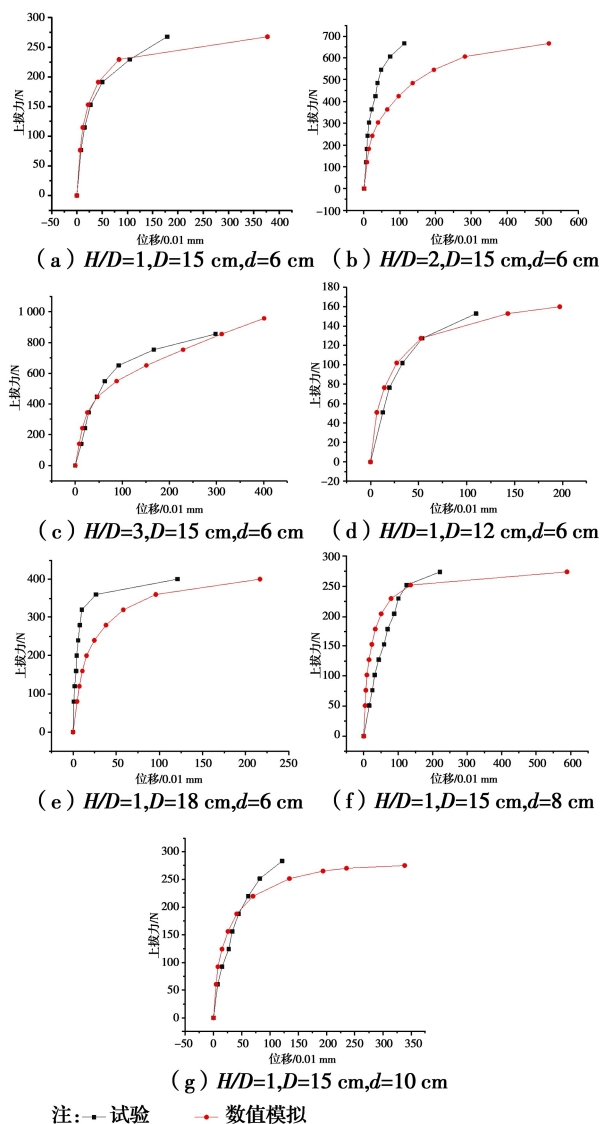


图 11 试验与数值模拟荷载-位移曲线对比图

Fig. 11 Comparisons of load-displacement curves between test and numerical simulation

出现剪切塑性区后仍可继续加载,直至剪切塑性区发展至土体表面形成贯通破坏,此过程中,荷载基本不变而位移持续增大,因而,数值模拟计算所得位移明显大于试验位移值。

如图 11(b)所示,埋深比为 2 的情况下,数值模拟位移值大于试验位移值,分析原因为,试验采用分层夯实的方法铺筑地基,在进行上层土夯实时,下层已经夯实的土体在已达到相似地基土参数的情况下,又受到夯实作用及上层土的下压作用,导致下层土体较上层土体更密实。不同深度土体物理力学性质存在差异,即使同层土体也无法做到绝对均匀夯实,而数值模拟计算采用的是上层土体参数且假定土体均匀,计算理想化。

4 结论

基于索连板球基础这一新的抗拔基础型式,采用试验和数值模拟计算相结合的方法,对其在沙漠砂土地基条件下的承载特性及其影响因素以及地基的变形演化规律进行研究,并探讨了土体表面主破裂面半径与其影响因素的关系,将数值计算结果与试验结果进行对比分析,所得结论如下:

1)室内相似模型试验得到的荷载-位移曲线呈线性增长→平缓→趋于水平的变化趋势,与上拔过程中土体变形演化 3 阶段相对应。

2)基础极限上拔荷载与埋深比、球径及水泥土柱直径的变化均呈正相关关系,且三者对极限上拔荷载的影响从大到小依次为:埋深比、球径、柱径。

3)极限抗拔承载力系数随埋深比增大呈先增大后减小的变化趋势,埋深比为 2 时,基础承载效率最高;极限抗拔承载力系数与球体直径呈负相关关系,与水泥土柱直径呈正相关关系;土体表面主破裂面半径与埋深比、球径及水泥土柱径均呈负相关关系。

参考文献:

- [1] 殷永高,孙敦华,龚维明. 根式基础承载特性的试验与数值模拟研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(12): 162-169.
- [2] YIN Y G, SUN D H, GONG W M. Experiment and numerical simulation of the bearing characteristics of root foundations [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(12): 162-169. (in Chinese)
- [3] 樊文伟,满银,丁士君,等. 中空基础在输电线路黄土地基中的承载特性[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(19): 272-276.
- [4] FAN W W, MAN Y, DING S J, et al. Bearing capacity of hollow foundation in loess foundation of transmission line [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(19): 272-276. (in Chinese)
- [5] 雒亿平,言志信. 大厚度黄土地联合板索基础及其特性[J]. 铁道建筑, 2016(11): 107-110.
- [6] LUO Y P, YAN Z X. Combined plate-cable foundation and its characteristics in loess site with large thickness [J]. Railway Engineering, 2016(11): 107-110. (in Chinese)
- [7] 雒亿平,范雪峰,付兵彬,等. 输电杆塔板式单索基础结构: ZL201220519599.6[P]. 2013-04-03.

- LUO Y P, FAN X F, FU B B, et al. The board and cable type foundation structure of transmission tower: ZL201220519599.6 [P]. 2013-04-03. (in Chinese)
- [5] 雒亿平,邓骁,言志信. 方形锚板联合板索基础极限上拔力研究[J]. 建筑结构, 2017, 47(13): 98-102.
- LUO Y P, DENG X, YAN Z X. Study of ultimate uplift force on joint plate cable foundation of square anchor plate [J]. Building Structure, 2017, 47(13): 98-102. (in Chinese)
- [6] 雒亿平,邓骁,言志信,等. 联合板索基础抗拔机理及允许上拔力[J]. 土木建筑与环境工程, 2016, 38(5): 85-89.
- LUO Y P, DENG X, YAN Z X, et al. Anti-tensile mechanism and allowable uplift force of joint plate cable foundation [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2016, 38(5): 85-89. (in Chinese)
- [7] 刘明亮,朱珍德,刘金元,等. 锚板抗拉破坏机制试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(3): 697-702, 708.
- LIU M L, ZHU Z D, LIU J Y, et al. Experimental study of failure mechanism of uplifting anchor [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(3): 697-702, 708. (in Chinese)
- [8] SIVARAMAN S, ILAMPARUTHI K, KISHORKUMAR V. Uplift response of single and multiple anchors in reinforced sand bed [C]// Indian Geotechnical Conference, 2014: 1941-1945.
- [9] SIVARAMAN S, ILAMPARUTHI K, KISHORKUMAR V. Experimental investigations on behaviour of single and multiple anchors in cohesionless soil [C]// Proceedings of the First Annual Conference on Innovations and Developments in Civil Engineering, ACIDIC-2014 NITK, Surathkal, India, 2014: 819-820.
- [10] ILAMPARUTHI K, DICKIN A, MUTHUKRISNAIAH K. Experimental investigation of the uplift behaviour of circular plate anchors embedded in sand [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, 39(3): 648-664.
- [11] HANNA A, AYADAT T, SABRY M. Pullout resistance of single vertical shallow helical and plate anchors in sand [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2007, 25(5): 559-573.
- [12] 夏元友,陈晨,NI Qing,等. 透明土中连续球体型锚杆拔出机理研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(5): 804-812.
- XIA Y Y, CHEN C, NI Q, et al. Pull-out mechanism of continuous ball shape anchors in transparent soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(5): 804-812. (in Chinese)
- [13] 言志信,雒亿平,张继婷,等. 土地基单索抗拔基础及其施工方法: ZL201610215868.2 [P]. 2016-04-09.
- YAN Z X, LUO Y P, ZHANG J T, et al. Soil ground single cable uplift foundation and construction method: ZL201610215868.2 [P]. 2016-04-09.
- [14] 雒亿平,薛晶,言志信. 索连板球基础上拔机理[J]. 土木建筑与环境工程, 2018, 40(6): 22-28.
- LUO Y P, XUE J, YAN Z X. Uplift mechanism of foundation of plate and ball connected by anchor cable [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2018, 40(6): 22-28. (in Chinese)
- [15] 丁栋. 索联板球基础抗拔机理相似模型试验研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2016.
- DING D. The model test study on uplift mechanism for the foundation of cable linking with concrete slabs-ball [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2016. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)