

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.06.004



索连板球基础上拔机理

雒亿平^{1,2}, 薛晶¹, 言志信^{1,3}

(1. 兰州大学 土木工程与力学学院, 兰州 730000; 2. 国网甘肃省电力公司经济技术研究院, 兰州 730050;
3. 河南城建学院 土木与交通工程学院, 河南 平顶山 467036)

摘要:针对既抗压又抗拔基础存在的缺陷和不足,尤其是特殊场地条件下施工困难的问题,构建了索连板球基础。该基础主要由水泥土柱、上板、下球体和须发锚索 4 部分构成,其中水泥土柱、下球体与须发锚索构成球索基础,由该球索基础承担上拔力。通过理论推导和数值模拟,分析了球索基础的抗拔机理及其与土体之间的相互作用,以及球索基础周围土体的变形开裂过程,揭示了球索基础的变形破坏规律和上拔力与埋深比之间的关系。

关键词:球索基础;极限上拔力;抗拔机理;埋深比

中图分类号:TU476 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2018)06-0022-07

Uplift mechanism of foundation of plate and ball connected by anchor cable

Luo Yiping^{1,2}, Xue Jing¹, Yan Zhixin^{1,3}

(1. School of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, P. R. China; 2. The Research Institute of Economics and Technology of Gansu Province Electric Power Company, State Grid Corporation of China, Lanzhou 730050, P. R. China; 3. School of Civil and Transportation Engineering, Henan University of Urban Construction, Pingdingshan 467036, Henan, P. R. China)

Abstract: An anchor cable connecting plate and ball was developed mainly for overcoming deficiency of current foundation subjected to both compressive and pull-out stresses, as well as the difficulty of construction in problematic ground conditions. The basis primarily consists of the cement soil column, the upper plate, the lower ball and the beard anchor. The cement soil column, lower ball and the beard anchor formulate the ball cable foundation, which handles the uplift force. Combining theoretical analysis with numerical simulation, the anti-tensile mechanisms of the ball cable foundation were explored, and the interaction between the ball cable foundation and soil mass was investigated. Moreover, we also studied the deformation process of the soil mass surrounding the ball cable foundation. The results revealed the evolving law of the deformation of the soil mass surrounding the ball cable, and the relationship between the uplift force and the bury depth.

收稿日期:2017-11-03

基金项目:国家电网公司科技项目资助(KJ[2013]9,SGTYHT/13-JS-175)

作者简介:雒亿平(1984-),男,博士生,高级工程师,主要从事岩土工程研究,E-mail:luoyipingxy@163.com。

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

Received:2017-11-03

Foundation item: Science and Technology Project of Grid Corporation of China (No. KJ(2013)9, SGTYHT/13-JS-175)

Author brief: Luo Yiping(1984-), PhD candidate, senior engineer, main research interests: rock and soil engineering, E-mail: luoyipingxy@163.com.

Yan Zhixin(corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: yzx10@163.com.

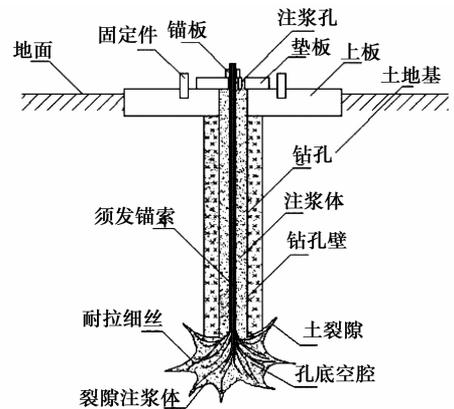
Keywords: ball and cable foundation; extreme uplift force; resistance uplift mechanism; buried depth ratio

迄今为止,绝大部分基础为抗压基础,即基础主要承受上部结构施加的竖向下压荷载,且满足变形和稳定性要求,典型的基础形式包括独立基础、桩基础、条形基础、筏板基础等。然而,随着工程建设的发展,一些基础形式不仅要具备一般基础的抗压和抗水平滑移功能,而且要具备足够大的抗拔能力^[1-2],现有抗拔基础形式较少,主要有“大开挖”基础、“掏挖扩底桩”基础、“爆扩桩”基础等。“大开挖”基础是指埋置于预先挖好的基坑内并回填,且将回填土夯实的基础,以扰动的回填土为抗拔土体,从而保持基础稳定^[3-5];“掏挖扩底桩”基础是指以钢筋笼为骨架,混凝土灌注于以机械或人工掏挖成的土胎内的基础,以天然土体的抗拔能力而保持基础上拔稳定^[6-7];“爆扩桩”基础是指以钢筋为骨架,混凝土灌注于以爆扩成型的土胎内扩大端的短桩基础,抗拔土体基本接近于未扰动的天然土^[8]。另外,笔者发明了利用埋置于地基土体中的锚板抗拔的联合板索基础^[1,9]。无论是“大开挖”基础,还是“掏挖扩底桩”基础或是“爆扩桩”基础,施工均有较大难度,而且存在工程量大、耗时长、成本高等问题,且对环境造成较大破坏,提供的抗拔力有限、加固效果不够理想^[1,10];虽然联合板索基础能够提供较大的抗拔力,并能降低工程费用,但施工难度仍然较大^[1,9]。人们在探索不同基础型式的同时,对砂土和黄土中锚板的抗拔机理进行了研究^[1,10],并探讨了扩底桩基础极限抗拔承载力的理论计算^[6-7],但少有研究涉及上拔力作用下基础周围土体变形破坏过程的分析,至于风积砂土地基,至今仍无合适的基础型式,更未对其开展研究^[11]。

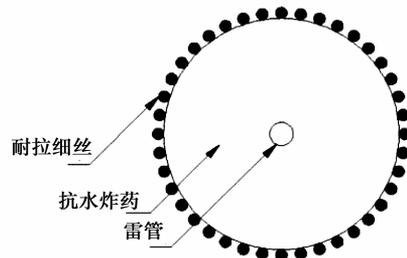
1 索连板球基础

提出了一种减小对地基扰动,提高抗压、抗拔强度,并优化荷载传递机制,同时减小土体变形的基础,如图 1(a)所示。该基础主要由水泥土柱、上板、下球体和须发锚索 4 部分构成,即主要包括构建于土地基的水泥土柱、嵌入地基中的上板、埋于地下的下球体和联系上板与下球体的须发锚索 4 部分。图 1(b)所示的须发锚索由耐拉细丝(通常为钢绞线)构成。起初所述耐拉细丝的下部顺周长方向均匀分布于装有雷管的抗水炸药周围,即起初的耐拉细丝下部捆扎装有雷管的抗水炸药,并被置于地基中通过多次爆破形成的球形空腔之内。该球形空腔通过先

在性能软弱,即抗压强度不高易变形土体中构建水泥土柱对软弱地基进行处理,然后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而形成。用注浆体浇注球形空腔后引爆炸药,利用炸药爆炸的爆轰压力驱使刚浇注未固结的注浆体充填球形空腔,并使包围在未固结注浆体中的须发锚索散开分布于球形空腔。注浆体固结后,须发锚索底部获得锚固,将其顶端与所述上板连接到一起,然后施加预应力于须发锚索,再次用注浆体浇注球形空腔和水泥土柱中的钻孔,构建起上板和下球体通过下部锚固于球形空腔而其余部分锚固于水泥土柱钻孔之中的所述须发锚索相联系的索连板球基础^[11]。



(a) 索连板球基础结构示意图



(b) 须发锚索爆破前装药段横截面示意图

图 1 索连板球基础示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the ball cable foundation

索连板球基础上板主要抵抗下压,承受下压力;同时,抵抗水平滑移,承受水平力。下球体主要抵抗上拔,承受上拔力。对下球体的上拔力主要通过须发锚索传递,即须发锚索主要传递上拔力。

索连板球基础与现有技术相比具有以下优点:

1) 扩孔炸药爆炸产生的爆轰气体对钻孔孔底强烈地冲击压缩,致使钻孔底周围土体被粉碎,形成大小足够的空腔。通过注浆形成带底端扩大头的锚固体,所提供的锚固力足以使上部结构上拔稳定;炸药爆炸所产生的爆轰气体对钻孔孔底土体强烈作用,

使孔底周围土体得到压缩,同时将土体中的裂隙推开,充填注浆体后将改善和提高地基(钻孔底部周围土体)的物理力学性能;钻孔底注浆后即刻起爆被掩埋的炸药,爆炸作用强力驱动注浆体充填孔底球形空腔,并使须发锚索散开分布于球形空腔,注浆体将须发锚索锚固,形成以锚固于孔底球形空腔和水泥土柱钻孔中的须发锚索为核心的全方位、立体、复合锚固,使工程的安全得到保障。

2)索连板球基础结构简单,从根本上改变了施工和基础型式,显著地节约了投资,减少了弃土,使环境得到保护。

2 球索基础上拔机理

索连板球基础的抗拔功能完全由埋置于地基中的下球体、须发锚索和水泥土柱构成的球索基础承担,因此,可通过对球索基础建模进行数值模拟分析,从而实现对接连板球基础的抗拔研究。

2.1 浅埋球索基础的上拔

采用 FLAC3D 建模,根据经验,并综合考虑应力、位移的精度要求和计算速度,确定模型中土体单元的尺寸,并进行网格划分。基于球索基础的结构及其与周围土体的相互作用,对球索基础及其周围的网格划分较细,随着与球索基础距离的增大,网格尺寸以 1.1 的比率增大,建立的数值模拟模型为:水泥土柱直径 6 cm,下球体直径 15 cm,埋深比(下球体球心的入土深度与其直径之比)2;土体模型尺寸为 $X \times Y \times Z = 1 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 0.425 \text{ m}$,共划分网格 25 480 个,相应节点 28 033 个。将土体作为弹塑性介质,遵从 Mohr-Coulomb 屈服准则,对模型进行非线性分析^[12],研究球索基础的抗拔机理和特性。

结合甘肃地区的砂土地质环境和条件以及工程要求开展研究,砂土样取自具有较好代表性、地处腾格里沙漠区的甘肃省民勤县,基本反映了甘肃地区非饱和砂土的特性。数值模拟中的物理力学参数均通过现场取样测试,然后按相似比换算获得。理论上,砂土的黏聚力为 0,但由于水的表面张力导致砂土存在假黏聚力,测试值为 1.25 ~ 12.5 kPa,故数值模拟中黏聚力取值为 1.25 kPa,如表 1 所示。

表 1 模拟计算参数

Table 1 Simulation calculation parameters

名称	$\gamma /$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	$E_s /$ MPa	μ	$\varphi / (^\circ)$	C / kPa
砂土样	17.5	2	0.25	35	1.25
下球体	75	2.5×10^3	0.29		

根据对接连板抗拔研究的经验^[13-14],位移场能较好地反映土体的变形,而剪应变场能较好地反映土体破坏面的形成,将它们作为深入分析索连板球基础的球索与土体的相互作用、协同工作和变形演化及其影响因素的重要依据。球索基础是抵抗上拔的结构,上拔过程中的抗拔力主要源于基础本身的自重、破裂面内土体重量以及破裂面之外土体在破裂面上施加的剪力和拉力。数值模拟发现,浅埋球索基础在上拔力作用下经历 3 个阶段。

第 1 阶段,即起始阶段。如图 2(a)所示,该阶段球索基础受到的上拔力较小,与这一阶段较小的上拔力对应,基础上拔位移和土体变形均比较小,土体没有发生破坏。

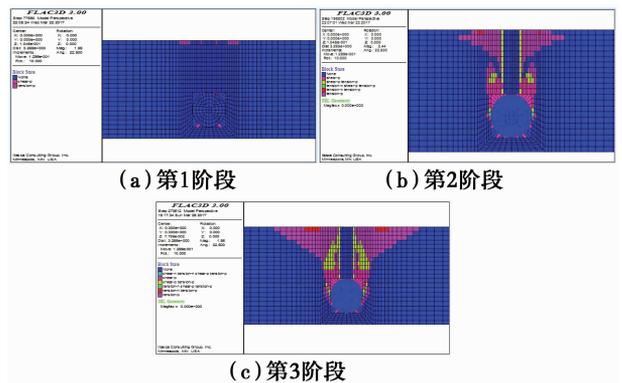


图 2 土体中塑性区演化剖面图

Fig. 2 Evolution profile of plastic zone in soil

第 2 阶段,即发展阶段。如图 2(b)所示,该阶段随球索基础受到的上拔力增大,下球体对周围土体的作用也随之增强,下球体之上部分土体受到的剪应力达到土体的抗剪强度而破坏,即局部剪切破坏;同时,受到上拔力作用的水泥土柱发生拉伸变形,从而带动其周围的部分土体产生向上的位移,甚至部分土体发生粘结破坏。图 2(b)中水泥土柱周围部分土体由于上拔力的作用导致其同时受到剪应力和拉应力的作用。随上拔力增大,土体变形破坏逐步发展,土体中受影响范围以锚索为对称轴水平向拓展,并且从下球体和地面两端沿锚索向中部发展,环绕下球体上表面斜向上一定范围内的土体中陆续形成破坏区,并最终发展至地表,形成倒钟形的破坏面。下球体上表面土体受到的力可分解为沿下球体径向和切向的分力,随下球体受上拔力作用而发生向上的位移,切向分力将使土体发生拉伸破坏,所以,下球体表面土体发生剪切破坏的同时,还发生拉伸破坏,下球体之下的土体也受拉伸作用而发生粘结破坏脱离下球体。

第 3 阶段,即整体破坏阶段。如图 2(c)所示,该

阶段下球体对上拔力特别敏感,即上拔力稍有增大,球索基础的位移获得显著增大。下球体上部土体中的剪切破坏面与地表拉伸破坏面贯通时,土体破坏,土体中形成过下球体球心的水平截面边缘,即水平大圆开始直至地表的轴对称破坏曲面,图 2(c)所示即为对应的塑性区。

随着球索基础受上拔力作用向上位移,岩土体中的塑性区将按照图 3 所示的破坏模式逐渐从下球体向地表发展,土中的剪应变区向上发展的同时,以一定角度外倾横向,即水平向拓展,逐渐发展至土体表面,把剪切变形的峰值点用线连起来,将形成以过下球体球心和过水泥土柱轴线的锚索为轴延伸到地表,并在向上过程中逐步向周围拓宽的旋转曲面,破坏面为轴对称的曲面。

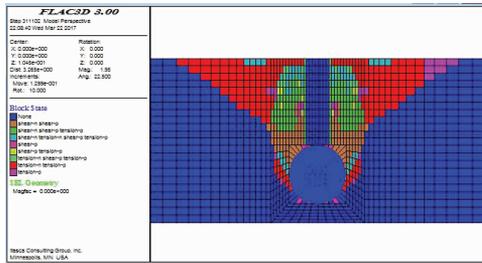


图 3 浅埋球索基础周围土体塑性区分布剖面图
Fig. 3 Distribution profile of plastic zone around the cable foundation of shallow buried sphere

从图 4 中可以看出,随着上拔力的增大,剪应变随之增大,砂土中的塑性区得以发展。起初砂土中的剪应变最大值区域分布在水泥土柱周围和下球体上表面斜上方的与 X 轴正负方向均为 $15^\circ \sim 45^\circ$ 区域的土体内;随着上拔力的不断增大,剪应变获得持续增加,其最大值区域不断拓展,向斜上方延伸,最终贯通地表导致球索基础破坏。

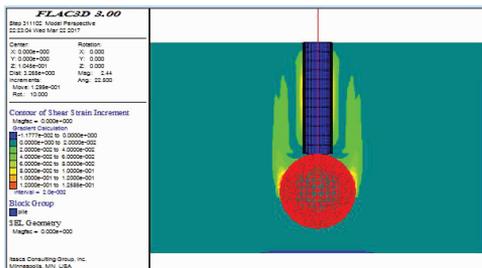


图 4 浅埋球索基础周围土体剪应变云图(剖面图)
Fig. 4 The shear strain of the soil around the shallow buried sphere cable foundation (section map)

图 5 揭示了浅埋球索基础上覆土体地表塑性区随上拔力增长的发展过程。随着上拔力的持续增大,岩土体中的塑性区得到大的发展,剪应变获得大的增长,地面上锚索周围区域土体发生拉伸破坏。

这是由于在上拔荷载作用下,剪切破裂面是曲面,地表面上塑性区边缘处土体受到的力是斜向上的,该力使得地表土体在向上隆起的同时,土体在水平方向的破坏范围从下至上逐步扩大,地表土体的塑性区远大于下球体最大水平截面面积,即大圆的面积。当地表拉伸破坏面与下部剪切破坏区域贯通形成完整的破坏面时,基础失效。当上拔力进一步增大,剪切变形和拉伸变形都得以扩张,在两者共同作用区域形成剪切-拉伸破坏复合变形破坏区,此时的土体已发生整体破坏,上拔力不变,位移持续增长。

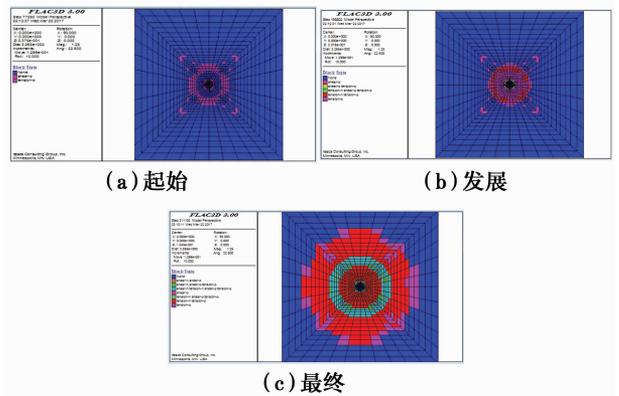


图 5 浅埋球索基础地表塑性区分布图
Fig. 5 Surface plastic zone distribution map of shallow buried ball cable foundation

与数值模拟相对应,进行了室内相似模型试验。室内相似模型试验根据甘肃省民勤县砂土样测试数据,相似比取 8 进行换算,从而获得室内相似模型试验砂土相似材料的物理力学参数,进而配制出砂土的相似材料,开展室内相似模型试验,即如图 6 所示的浅埋球索基础拉拔试验。模型试验同样表明,随着锚索上拔力的持续增大,锚索和水泥土柱发生向上的位移,周围的地表面不断隆起,并随上拔位移的增大,即土体的不断隆起,锚索和水泥土柱周围出现径向和环向裂缝,且裂缝持续增多,其宽度和深度持续扩大,其分布范围自锚索发展至锚索周围的一定区域,如图 6、图 7 所示。数值模拟与模型试验实现了相互印证。



图 6 浅埋球索基础拉拔试验
Fig. 6 Pullout test of the shallow buried ball cable foundation



图 7 浅埋球索基础地表破坏情况

Fig. 7 Surface failure of the shallow buried ball cable foundation

2.2 深埋球索基础的上拔

在球索基础浅埋条件下,即球索基础的埋深比较小时,随着埋深的增大,其极限抗拔力得到持续提高,土体内和地表的破裂范围也得到持续的增大,其破裂如图 3 所示,为倒钟形开口朝上直至地表的旋转曲面。但球索基础的埋深继续增大时,情况发生根本变化,其破裂范围不仅不再增大,反而减小,同时破裂面的形状也不再是倒钟形开口朝上直至地表的旋转曲面,而是转换成花瓶状的旋转曲面,即球索基础的剪切应变和塑性区呈花瓶形分布,且随球索基础埋深比的增大,花瓶口、瓶颈的直径逐渐减小,主要集中在下球体的上方,瓶口位置在锚杆和水泥土柱出露地表处。将这种根本变化对应的球索基础埋深定义为临界埋深,相应的埋深比定义为临界埋深比,球索基础埋深小于临界埋深定义为浅埋,相应地,大于临界埋深定义为深埋。研究发现砂土地基的临界埋深比一般为 2.5~3.5。如图 8、图 9 所示,采用前述的方法建模,对埋深比为 5 的深埋球索基础进行研究,由图可见,球索基础深埋条件下,其破坏形式由浅埋时的整体破坏转换为局部剪切破坏,对其极限抗拔力也产生大的影响。

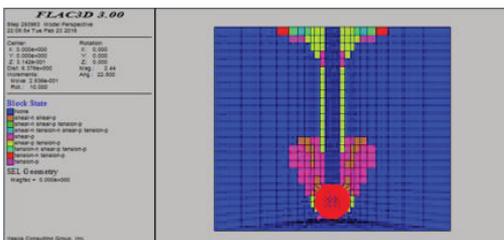


图 8 深埋上拔塑性区

Fig. 8 Uplift plastic zone of the deep buried ball cable foundation

如图 8 所示的花瓶口,即球索基础出露地表位置的塑性区,主要是因为在上拔力的作用下球索基础水泥土柱对土体的剪切作用带动土体产生向上的位移。此外,图中的花瓶肚,即球索基础下球体上方的塑性区,主要是因为在上拔力的作用下球索基础下球体对其周围的土体施加力的作用,使部分土体

产生塑性变形和位移。

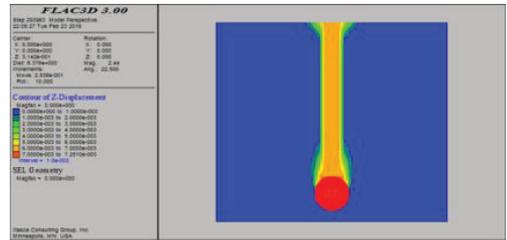


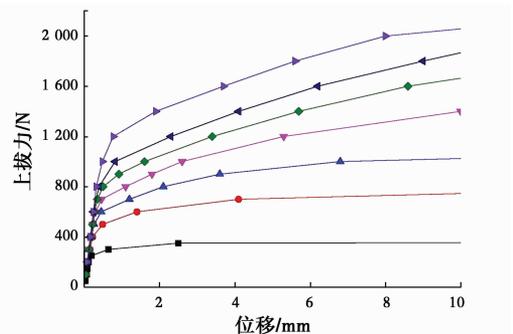
图 9 深埋上拔位移云图

Fig. 9 Uplift displacement nephogram of the deep buried ball cable foundation

2.3 埋深比对球索基础上拔的影响

已有锚板抗拔研究经验和文献均显示^[15-16],锚板的埋深比 H/D 在抗拔中的作用至关重要,对抗拔承载力的影响极大。随着埋深比的增大,抗拔承载力不断增大,但增幅不断减小,增长之势趋缓,且埋深比增大到某值时,基础的上拔情况发生根本的改变。

分别取埋深比 H/D 为 1、2、2.5、3、3.5、4、5 对大厚度非饱和砂土中的球索基础进行研究,得到了各埋深下的上拔力-位移曲线,如图 10 所示。



注: 埋深比 —■— 1 —●— 2 —▲— 2.5 —◆— 3 —★— 3.5 —×— 4 —+— 5

图 10 球索基础上拔力-位移曲线

Fig. 10 Force-displacement curve of spherical cable foundation

由图 10 可以看出,不同埋深比下的球索基础上拔力与位移的关系。起初,上拔力随位移呈线性增长,此时的土体仍处于弹性压缩阶段,但此阶段仅仅经历很小的位移。随着上拔力的继续增大,基础相对于砂土之间产生较大位移和变形,部分土体发生剪切破坏,承载力的增长减缓,呈曲线上升,即基础周围的土体进入局部剪切破坏阶段。且随着上拔力继续增大,基础周围的土体整体进入塑性破坏阶段,很小的上拔力增量可获得基础上拔位移的大幅度增长,甚至基础突然被拔出。

从图 10 还可以看出,随着球索基础埋深比的增加,特别是埋深比 H/D 从 3 开始,在上拔力作用下,

进入局部剪切破坏阶段后的位移增量相对较大,土体整体进入到塑性破坏阶段,上拔力-位移曲线已没有明显的转折点,说明此时球索基础已经进入深埋阶段。之后,仅下球体周围土体发生局部剪切破坏,下球体周围的塑性区已不能扩展至地表,地表的塑性区和破坏完全由锚索和水泥土柱的上拔造成,不再受埋深比影响。

此外,从图10还可以看出,与深埋锚板局部破坏时的极限抗拔力不增长的情况不同^[1,10],深埋条件下,随着球索基础埋深比的增加、水泥土柱长度的增加,其柱壁与土体的作用面积增大,极限抗拔力随之缓慢上升。

3 结论

现有抗拔基础型式有限,已不能适应特殊地基条件和工程要求的需要,针对这个问题发明了索连板球基础,以满足工程对抗拔基础之急需。索连板球基础是一种全新的基础型式,对索连板球基础的抗拔进行深入研究,得到以下结论:

1)索连板球基础结构简单,改变了施工和基础型式,节约了投资,减少了弃土,使环境得到保护。

2)浅埋条件下,随上拔力的增大,索连板球基础周围土体的变形和位移也随之增大,可将整个过程可分为3个阶段。

3)浅埋条件下,随上拔力的增大,土体的相对位移和变形增大,剪切破坏发生和发展,由局部剪切破坏直至整体破坏,形成自下球体贯通至地表的倒钟形开口朝上直至地表的旋转破裂曲面。深埋条件下,随着上拔力的增大,球索基础出露地表处出现塑性区,继而水泥土柱周围,最后下球体上方,塑性区呈花瓶状旋转曲面。

4)浅埋条件下,随着索连板球基础所受上拔力的增大,其上拔位移渐趋加速增长,但埋深比增大到某一值时,球索基础由浅埋过渡到深埋阶段。

参考文献:

[1] 范雪峰,龙哲,言志信. 黄土中联合板索基础的抗拔承载力变化规律及其影响因素[J]. 科技导报, 2014, 32(36): 86-92.
FAN X F, LONG Z, YAN Z X. Vertical uplift capacity of combined cable-slab foundation in loess and influencing factors [J]. Science & Technology Review, 2014, 32(36): 86-92. (in Chinese)

[2] 架空送电线路基础设计技术规定:DL/T 5219—2005 [S]. 北京:中国电力出版社, 2005.
Technical regulation for designing foundation of

overhead transmission line; DL/T 5219-2005 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2005. (in Chinese)

- [3] MURRAY E J, GEDDES J D. Uplift of anchor plates in sand [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1987, 113: 202-215.
- [4] ILAMPARUTHI K, DICKIN E A, MUTHUKRISHNAIAH K. Experimental investigation of the uplift behavior of circular plate anchors embedded in sand [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, 39: 648-664.
- [5] RAO K S S, KUMAR J. Vertical uplift capacity of horizontal anchors [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 7: 1134-1147.
- [6] 孙晓立,莫海鸿. 扩底抗拔桩变形的解析计算方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(Sup1): 3008-3014.
SUN X L, MO H H. An analytical calculation method for displacement of under-reamed tension piles [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(Sup1): 3008-3014. (in Chinese)
- [7] 孙晓立,杨敏,莫海鸿. 利用荷载传递法计算扩底抗拔桩的位移[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(12): 1815-1820.
SUN X L, YANG M, MO H H. Displacement of base-enlarged tension piles calculated by load transfer method [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(12): 1815-1820. (in Chinese)
- [8] 刘剑平,张慧乐,王述红,等. 扩体锚索承载特性的模型试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(4): 749-757.
LIU J P, ZHANG H L, WANG S H, et al. Model test research on bearing capacity of underreamed ground anchor [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(4): 749-757. (in Chinese)
- [9] 雒亿平,邓骁,言志信. 联合板索基础抗拔机理及容许上拔力[J]. 土木建筑与环境工程, 2016, 38(5): 85-89.
LUO Y P, DENG X, YAN Z X. 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)
- [10] 张昕,乐金朝,刘汉东. 砂土中锚板抗拔性能实验研究[J]. 实验力学, 2011, 26(4): 411-416.
ZHANG X, YUE J C, LIU H D. Experimental study on the uplift performance of plate anchor in sand [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2011, 26(4): 411-416. (in Chinese)

- [11] 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. (in Chinese)
- [12] 黄茂松, 余生兵. 基于块体集上限法的砂土中条形锚板抗拔承载力分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(2): 201-207.
HUANG M S, YU S B. Pull-out capacity of strip anchor plate in sand based on block set mechanism [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(2): 201-207. (in Chinese)
- [13] 刘明亮, 朱珍德, 刘金元. 基于 PIV 技术的锚板抗拉破坏模式识别[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2011, 39(1): 84-88.
LIU M L, ZHU Z D, LIU J Y. Identification of failure modes for uplift anchor plates based on PIV technology [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2011, 39(1): 84-88. (in Chinese)
- [14] SONG Z H, HU Y X, RANDOLPH M F. Numerical simulation of vertical pullout of plate anchors in clay [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2008, 134(6): 866-875.
- [15] 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. The board and cable type foundation structure of transmission tower: ZL201220519599.6 [P]. 2013-04-03. (in Chinese)
- [16] OUYANG C J, XU Q, HE S M, et al. A generalized limit equilibrium method for the solution of active earth pressure on a retaining wall [J]. Journal of Mountain Science, 2013, 10(6): 1018-1027.

(编辑 胡英奎)