

雒亿平,龙哲,宦国文,等.大厚度黄土地双索联合板索基础抗拔[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2020,35(3):57-62. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2020.03.009

Luo Y P, Long Z, Huan G W, et al. Study on Pulling Resistance of Double Anchor Cable Combined Plate Foundation [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2020, 35(3):57-62. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2020.03.009

# 大厚度黄土地双索联合板索基础抗拔

雒亿平<sup>1</sup>,龙哲<sup>2</sup>,宦国文<sup>3</sup>,言志信<sup>2\*</sup>

(1.国网甘肃省电力公司 经济技术研究院,甘肃 兰州 730050;2.河南城建学院 土木与交通工程学院,河南 平顶山 467036;  
3.云南省公路科学技术研究院,云南 昆明 650051)

**摘要:**“大开挖”基础、“掏挖扩底”基础、“爆扩桩”基础为现今主要既抗压又抗拔基础,针对3种基础型式存在的缺陷和不足,构建了双索联合板索基础并且获得了发明专利授权,该基础的上板主要承受下压力和水平力,两锚板承担上拔力.论文深入系统地分析研究了双索联合板索基础两锚板间距对极限抗拔力、锚板和土体位移、土体的剪应变、土中塑性区和破坏面的影响,结合与单索联合板索基础进行对比分析,揭示了双索联合板索基础的抗拔机理及其抗拔力、土体位移、土体剪应变、土体塑性区的演化规律,为该基础型式的设计和施工提供了支撑.

**关键词:**板索基础;基础;联合;锚板;双索

**中图分类号:**TU94 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2020)03-0057-06

## Study on Pulling Resistance of Double Anchor Cable Combined Plate Foundation

Luo Yiping<sup>1</sup>, Long Zhe<sup>2</sup>, Huan Guowen<sup>3</sup>, Yan Zhixin<sup>2</sup>

(1. The Research Institute of economics and technology of Gansu Province Electric Power Company, State Grid Corporation of China, Lanzhou 730050, China;  
2. School of Civil and Transportation Engineering, Henan University of Urban Construction, Pingdingshan 467036, China;  
3. Yunnan Research Institute of Highway Science and Technology, Kunming 650051, China)

**Abstract:** Large excavation foundation, digging belled pile foundation and explosive-enlarged pile foundation are present primarily used foundations that are both pulling resistant and compressing resistant. Focusing on the deficiencies of the three foundations, the double anchor cable combined plate foundation was constructed and authorized by the invention patent. The upper plate of the foundation mainly bears the downward pressure and horizontal force, and the two anchor plates bear the uplift force. The influence of the distance between two anchor plates on the ultimate uplift capacity of the double anchor cable combined plate foundation, displacement of anchor plate and soil, shear strain of soil, plastic zone and failure surface were analyzed systematically. By comparing with the single anchor cable connected anchor plate foundation, the uplift mechanism of the double anchor cable combined plate foundation and its uplift bearing capacity, displacement of soil, shear strain of soil and evolution law of plastic zone of soil were revealed, which provided support for the design and construction of

收稿日期:2016-04-25 修改日期:2020-07-09

基金项目:国家自然科学基金资助面上项目(41372307);国家电网公司科技项目资助(SGGSJY00GHJS1400055);河南省重点研发与推广专项(科技攻关)资助(2019017)

\*通信作者,E-mail: yzx10@163.com

the foundation type.

**Keywords:** plate cable foundation; foundation; joint; anchor plate; two anchor cables

在我国广大的湿陷性黄土地区,“大开挖”基础、“掏挖扩底”基础、“爆扩桩”基础为现今主要使用的既抗压又抗拔基础型式<sup>[1-4]</sup>。“大开挖”基础以回填土为抗拔土体,借助回填土的抗剪强度抵抗上拔力,以保持“大开挖”基础的稳定,由于回填土的强度较低,因而该基础型式主要靠扩大基础尺寸来提高抗拔力,增强基础的抗拔稳定性,但是扩大基础尺寸,不仅提高了基础造价和工程成本,而且大量弃土势必导致水土流失,对环境造成巨大破坏。而“掏挖扩底”基础以天然土为抗拔土体,利用天然原状土体的抗剪强度抵抗上拔力,以保持“掏挖扩底”基础的上拔稳定,由于天然土的强度较高,因而“掏挖扩底”基础具有良好的抗拔性能,该基础形式适宜于无水渗入基坑的黏性土地基。“爆扩桩”基础则依靠桩周与土的摩擦以抵抗上拔力,并以桩周与土的摩擦以及桩端承载力抵抗下压力,桩基础规范规定,黄土地区采用桩基础,基础持力层需穿过湿陷性黄土层,因而“爆扩桩”基础不适宜大厚度湿陷性黄土地基;另外,“爆扩桩”基础具有一定的隐蔽性,且施工难度大、施工工艺复杂、质量难以控制、质量问题难以及时发现,工后检测也存在一定的困难,且材料消耗大、工程成本高<sup>[5-8]</sup>。

## 1 双索联合板索基础及其数值模拟研究

鉴于上述基础型式存在的缺陷和不足<sup>[9-13]</sup>,针对湿陷性黄土地区大厚度黄土场地,作者基于单索联合板索基础以及对其进行的深入研究<sup>[14-16]</sup>,构建了双索联合板索基础以提高抗拔力,双索联合板索基础如图1所示,该基础主要由镶嵌于地表中的上板、埋于地基中的左右锚板和联结上板与两锚板的左右锚索3部分构成,并且左右锚板和锚索完全相同<sup>[17]</sup>。从其结构可知,该基础是一种新型抗压、抗水平滑移和抗拔基础,然而文献调研发现,迄今为止,尚无人对双索联合板索基础进行研究,因此很有必要对该基础的抗拔承载机理以及上拔力作用下土体的应力应变及其演化规律进行深入研究,以认识其可行性和优越性,为已获得发明专利授权的该基础型式的设计施工和推广应用提供支撑<sup>[17]</sup>。

如图1所示的双索联合板索基础,其上板承受向下的压力和水平力,即抗压、抗水平滑移,而锚板与锚索相结合抵抗上拔力,因而可获得如图2所示的上拔力计算模型。图2中,左右两锚板之间重叠区域的土体同时受到两锚板的上拔力作用。在进行理论计算时,一般假设上拔力作用下两锚板的破坏面相互独立,即互不影响,而实际上,上拔力作用下土体中的破坏面是两锚板共同作用的结果,由于两锚板完全相同,二者发挥的作用和产生的影响也相同。与单索联合板索基础时的情况不同,双索联合板索基础两锚板共同作用下土体的临界深度具有不确定性。因此,难以通过公式计算获得抗拔力的理论解,而通过数值模拟进行分析研究是可行的方法。

为了研究双索联合板索基础的极限抗拔力,取两正方形锚板的边长 $B$ 均为2 m,厚均为0.5 m,埋深比 $H_1/B$ 均为1,两锚板之间的距离为 $0.50B$ ,即1 m的情况进行数值模拟分析研究。数

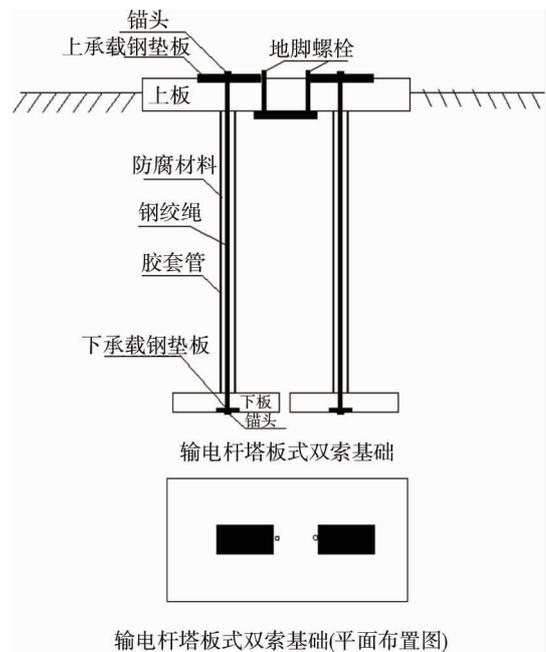


图1 双索联合板索基础

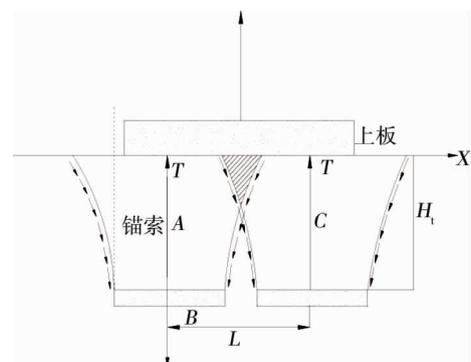


图2 抗拔力计算模型

值模拟中地基土体的物理力学参数均通过室内试验测得,具体地,土体的重度为  $14.5 \text{ kN/m}^3$ ,弹性模量为  $12 \text{ MPa}$ ,泊松比为  $0.39$ ,内摩擦角为  $24.3^\circ$ ,内聚力为  $25.6 \text{ kPa}$ ,抗拉强度为  $17 \text{ kPa}$ ,且采用弹塑性本构模型和 Mohr-Coulomb 屈服准则<sup>[14]</sup>;而数值模拟中锚板的弹性模量和剪切模量均设为土体的 100 倍,以保证计算过程中锚板不发生大的变形和破坏;另外,数值建模中土体和锚板均采用实体单元,并在它们之间加入接触面单元,即接触面单元附在密度较大的锚板的表面。

通过数值模拟施加向上拔力,获得了双索联合板索基础极限抗拔力,见表 1。为了对比,表 1 中同时列出了具有相同尺寸锚板的单索联合板索基础的极限抗拔力。

从表 1 可知,相同锚板尺寸和埋深,即正方形锚板边长和埋深均为  $2 \text{ m}$  条件下,单索联合板索基础的极限抗拔力较小,双索联合板索基础使得极限抗拔力得到显著提高,具体地,比单索联合板索基础提高了  $62\%$ ,达到  $1\,380 \text{ kN}$ ,这说明当工程需要时,可利用双索联合板索基础提高抗拔力。

进一步,通过改变双索联合板索基础两锚板之间的距离,即在前述研究两锚板之间距离为  $0.50B = 1.0 \text{ m}$  时的极限抗拔力基础上,再研究两锚板之间的距离分别为  $0.25B = 0.5 \text{ m}$ ,  $0.75B = 1.5 \text{ m}$  和  $1.00B = 2.0 \text{ m}$  时的极限抗拔力,获得了如图 3 所示的双索联合板索基础极限抗拔力-锚板间距曲线,由图 3 可见,随两锚板间距增大,两锚板的相互影响趋弱,锚板各自的独立性增强,双索联合板索基础的极限抗拔力增大,且极限抗拔力渐趋于单索联合板索基础极限抗拔力的两倍。但锚板间距过大将导致施工难度大大增加、性价比降低。

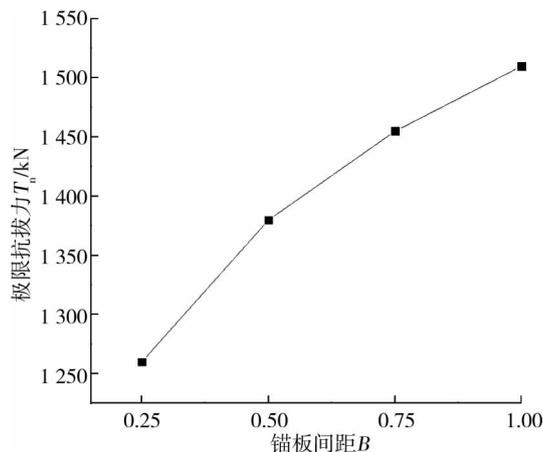
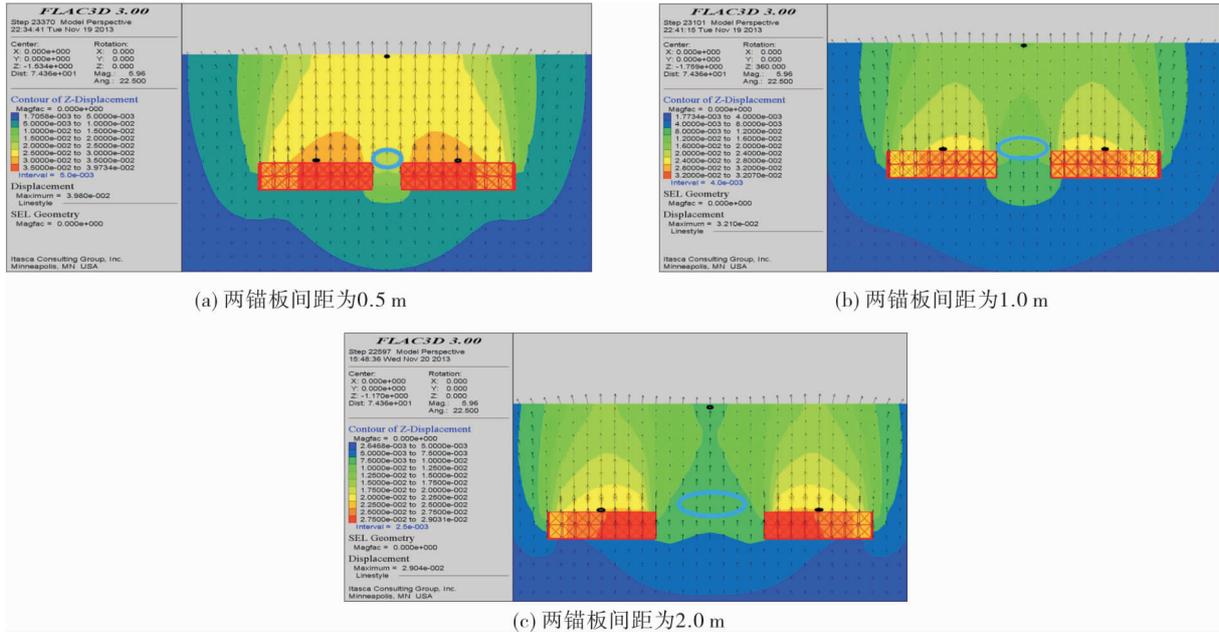


图 3 双索联合板索基础极限抗拔力-间距曲线

## 2 锚板间距对位移的影响

前述已经详细介绍了双索联合板索基础及其埋置情况,下面仅改变两锚板间距,利用大型岩土分析软件 FLAC<sup>3D</sup> 分析研究两锚板间距对双索联合板索基础位移的影响。图 4 为数值模拟计算获得的  $1\,200 \text{ kN}$  上拔力作用下,双索联合板索基础两锚板间距分别为  $0.25B = 0.5 \text{ m}$ ,  $0.50B = 1.0 \text{ m}$  和  $1.00B = 2.0 \text{ m}$  的土体位移矢量图,由图 4 可知,左右两锚板在上拔力的作用下具有向上运动的趋势,从而压缩其上方的土体,使土体发生变形和位移,与单索联合板索基础仅一个锚板对土体施加向上压缩的情况不同<sup>[14-16]</sup>,双索联合板索基础的左右两锚板同时对上方的土体施加压力,使上方的土体发生压缩变形,产生向上的位移,因而,上方土体的变形和位移是左右两锚板共同作用的结果。

同时,由图 4 可以看出,随着左右两锚板间距由  $0.5 \text{ m}$  增大到  $2.0 \text{ m}$ ,两锚板之间的土体(图中蓝色椭圆所处区域)的位移逐渐减小,这是由于两锚板在上拔力作用下均对这部分土体施加力的作用,这部分土体的位移是两锚板单独导致位移的叠加即合成。又由于两锚板之间土体的位移因叠加而增大,必然导致两锚板均出现不均匀抬升,从而弱化锚板的抗拔性能,导致双索联合板索基础无法获得 2 个单索联合板索基础的抗拔力。



(a) 两锚板间距为0.5 m

(b) 两锚板间距为1.0 m

(c) 两锚板间距为2.0 m

图4 双索联合板索基础位移矢量图

不仅如此,由图4还可以看出,双索联合板索基础在上拔力的作用下,通过两锚板对更大范围的土体施加力的作用,因而在相同上拔力条件下相对于单索联合板索基础,土体的位移更小。

更进一步,根据数值模拟计算结果,可获得双索联合板索基础土体位移-锚板间距曲线,如图5所示。由图5可以看出,随着左右两锚板间距增大(图5中间距由 $0.25B$ 增大至 $1.00B$ ),在相同大小上拔力的作用下两锚板的位移,具体地,锚板中心即图4中左右黑点的位移减小,两锚板周围土体的位移也减小,例如两锚板之间中点正上方地表的位移,即图4中地表黑点的位移亦减小,而且,从图5可见,地表位移的减小幅度比锚板的更大。

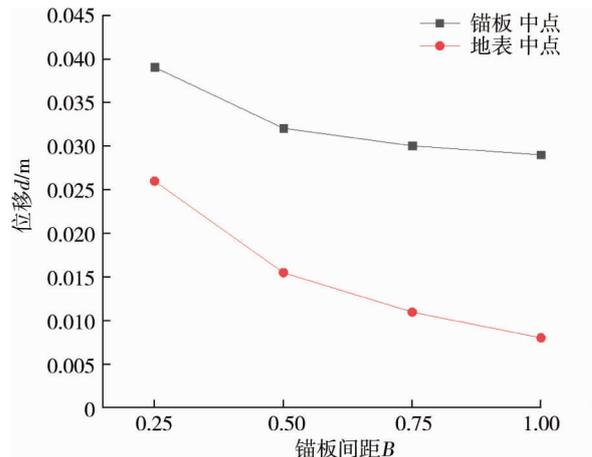


图5 双索联合板索基础土体位移-锚板间距曲线

### 3 锚板间距对剪应变的影响

图6为1200 kN上拔力作用下,双索联合板索基础两锚板间距分别为0.5,1.0和2.0 m的土体剪应变云图,由图6可见,当双索联合板索基础的两锚板间距较小,为0.5 m时,两锚板上方土体的剪应变云图不仅左右对称,而且可视为一个整体,类似单索联合板索基础上拔的情形;当两锚板间距为锚板边长的一半,即1.0 m时,两锚板上方土体的剪应变云图也呈左右对称分布,且剪应变云图呈向上发展的同时,向中部拓展;当两锚板间距较大,等于锚板边长2.0 m时,两锚板上方土体的剪应变云图也呈左右对称分布的同时,与两单索联合板索基础并列时的剪应变云图趋同。

分析上述现象产生的原因,在于双索联合板索基础在上拔力的作用下,导致土体中发生剪切相互作用,相邻土体剪应力变化大的地方剪应变大、相对变形大、相对位移大。单索联合板索基础在上拔力的作用下,相邻土体剪应力变化大的地方为锚板边缘的土体,导致该部位土体的剪应变大、相对变形大、相对位移大。双索联合板索基础情况下,不仅土体的剪应变和位移更小,而且,两锚板的间距不同,在上拔力的作用下所导致的土体中剪应力变化情况不同,两锚板间距小时,二者共同使土体发生变形和产生位移,两锚板之间的土体相对变形和位移小,两锚板的其他边缘土体与单索联合板索基础的情况基本相同,只不过比单

索联合板索基础时的更小;而随着两锚板间距增大,二者协同作用减弱,它们之间土体的相对变形和位移增大,而且剪应变和变形及位移向上发展的同时,向中部拓展开来;当两锚板间距增大到一定值,两锚板对土体内剪应变的影响就演化成了 2 个完全相同的单索联合板索基础的情况了。

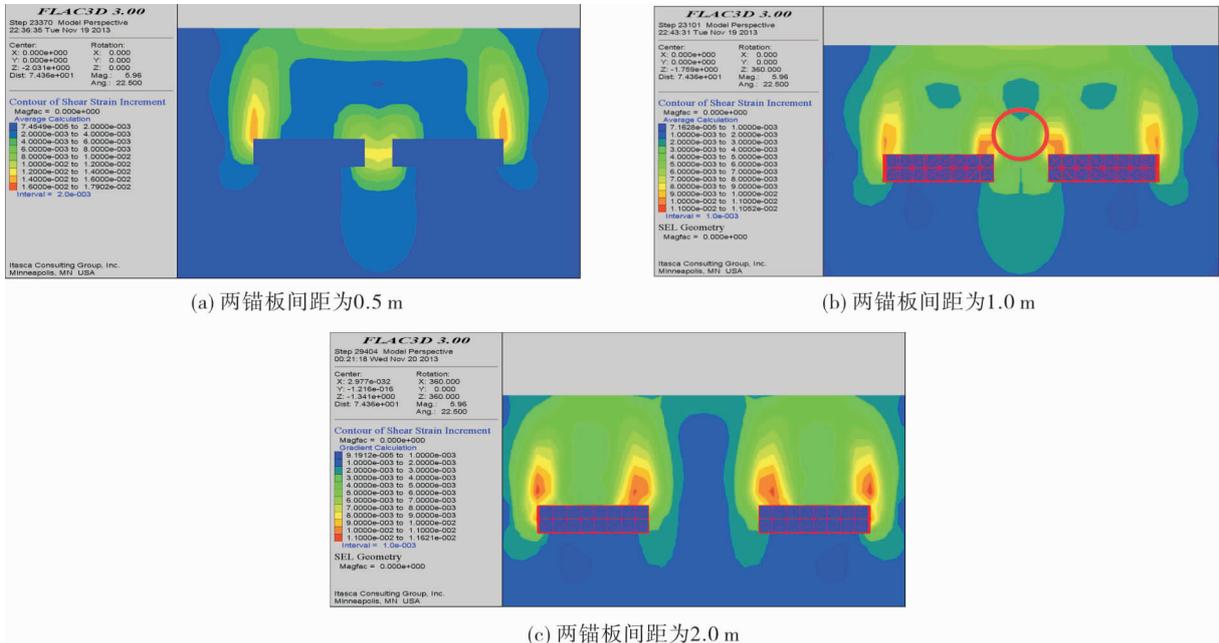


图 6 双索联合板索基础剪应变云图

### 4 锚板间距对塑性区的影响

图 7 为 1 200 kN 上拔力作用下,双索联合板索基础两锚板间距分别为 0.5,1.0 和 2.0 m 的土体塑性区云图,由图 7 所示的塑性区分布情况可以看出,当双索联合板索基础的两锚板间距较小时,由于上拔力作用下两锚板间土体剪应变较小,两锚板间土体的塑性区发展有限,此时与单索联合板索基础的情况基本相同,即可将两锚板当作一个更大的单索联合板索基础来分析土体的变形破坏情况;而随着锚板间距的增大,两锚板的协同作用趋弱,两锚板间土体剪应变增大,两锚板间土体的塑性区得到更大的发展,但除两锚板之间的土体外,与单索联合板索基础时的差不多,两锚板的其他边缘土体为剪应力集中区,

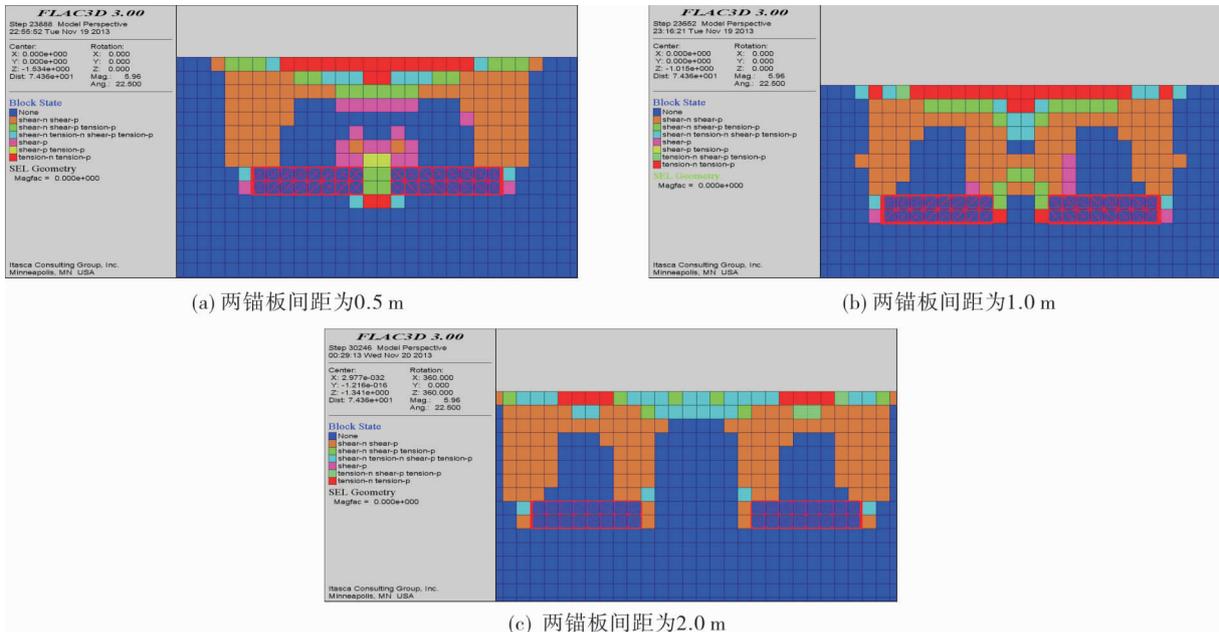


图 7 双索联合板索基础塑性区云图

形成塑性区并自锚板边缘向上发展和拓宽,当土体的剪应力达到土的抗剪强度时,土沿着剪应力作用方向产生相对滑动,导致剪切破坏发生,而且随着上拔力的增大,起自锚板边缘的土体剪切破坏不断向上方发展,塑性区不断拓宽,在土体中逐步形成通达地表面的曲面,图7中的棕色显示的即为塑性区。

## 5 结论

- 1) 双索联合板索基础两锚板之间土体的剪应力、剪应变、变形和位移等,均同时受到两锚板的影响。
- 2) 双索联合板索基础两锚板在上拔过程中出现不均匀抬升。
- 3) 双索联合板索基础两锚板的间距较小时,锚板间土体的剪应变较小,可将两锚板视为一个整体,类似单索联合板索基础上拔进行研究。
- 4) 在不变的上拔力作用下,双索联合板索基础两锚板间距增大,锚板及土体的位移减小。
- 5) 双索联合板索基础两锚板间距增大,两锚板总的极限抗拔力增大。
- 6) 双索联合板索基础两锚板间距增大,两锚板的协同作用趋弱,两锚板间土体剪应变增大,两锚板间土体的塑性区得到更大的发展。

### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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(z1): 3008-3014.
- [3] Quyang 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 ENCE, 2013, 10(6): 1018-1027.
- [4] 朱泳,朱鸿鹄,李飞,等. 砂土中水平锚板抗拔特性试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(7): 1768-1774.
- [5] MURRAY E J, GEDDES J D. Uplift of anchor plates in sand[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1987, 113(3): 202-215.
- [6] DICKIN E A, LEUNG C F. Performance of piles with enlarged bases subject to uplift forces[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1990, 27(5): 546-556.
- [7] Rao K S, Kumar J. Vertical uplift capacity of horizontal anchors[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 120(7): 1134-1147.
- [8] 宦国文. 黄土中锚板抗拔机理及理论分析[D]. 兰州: 兰州大学, 2015.
- [9] 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(3): 648-664.
- [10] 李青,艾志诚. 临坡条形锚板抗拔承载力试验及理论分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(12): 2960-2968.
- [11] 王雪姣,言志信,龙哲. 索连板球基础竖向抗拔承载特性及其影响因素[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2019, 41(4): 36-43.
- [12] Song Z, Hu Y, Randolph M, et al. Numerical simulation of vertical pullout of plate anchors in clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2008, 134(6): 866-875.
- [13] 于龙,刘君,孔宪京. 锚板在正常固结黏土中的承载力[J]. 岩土力学, 2008, 28(7): 1427-1434.
- [14] 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.
- [15] 雒亿平,邓骁,言志信. 联合板索基础上板承载稳定性研究[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2018, 33(4): 34-39.
- [16] 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.
- [17] 雒亿平,范雪峰,付兵彬,等. 输电杆塔板式双索基础结构:ZL201220519599.6[P]. 2013-01-30.