

DOI: 10.11779/CJGE2019S2023

# 砂土中扩底应力对深埋扩底抗拔桩承载力的影响

陈佳茹<sup>1, 2</sup>, 张陈蓉<sup>\*1, 2</sup>, 黄茂松<sup>1, 2</sup>, 杨学林<sup>3</sup>

(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. 浙江省建筑设计研究院, 浙江 杭州 310006)

**摘要:** 采用极限平衡法计算深埋扩底抗拔桩的承载力, 需要确定破坏面的形状参数和应力条件。针对已有模型试验的研究结果, 结合不同桩长扩底抗拔桩统一破坏模式, 对上述问题进行了初步探讨。基于应力莫尔圆研究认为, 仅考虑自重应力条件得到的破坏面法向应力明显小于扩底附近的实际破坏面应力条件, 导致破坏面影响高度计算结果偏大。基于模型试验的试验结果, 对扩底应力的增强系数进行了反算, 该值在 1.3 到 2.7 之间, 比被动土压力系数 3.4 要小, 对扩底角度变化不敏感。只是初步的机理探讨, 考虑到深埋扩底桩的埋深影响, 该问题值得进一步深入研究。

**关键词:** 扩底抗拔桩; 深埋; 扩底应力; 抗拔承载力

中图分类号: TU431

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)S2-0089-04

**作者简介:** 陈佳茹(1996—), 女, 硕士研究生, 主要从事基础工程方面的研究。E-mail: 1732240@tongji.edu.cn。

## Influences of stress around enlarged base to uplift capacity of deep belled piles in sand

CHEN Jia-ru<sup>1, 2</sup>, ZHANG Chen-rong<sup>1, 2</sup>, HUANG Mao-song<sup>1, 2</sup>, YANG Xue-lin<sup>3</sup>

(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. Zhejiang Prov. Institute of Architectural Design and Research, Hangzhou 310006, China)

**Abstract:** It is necessary to determine the shape parameters of the failure surface and stress conditions of soil when the limit equilibrium method is adopted to calculate the bearing uplift capacity of a deep belled pile. Based on the published model test results, a preliminary discussion is given on the above problems with a unified failure mode for belled piles with short or long pile lengths. According to the concept of Mohr stress circle, if only the self-weight is considered, the normal stress of the failure surface is obviously less than the actual one around the enlarged base and leads to a larger influence height. Based on the model test results, the stress coefficient on the failure surface is back calculated, and it is found that the value of coefficient is in the range of 1.3 to 2.7, which is insensitive to the base angle. The effect of embedment depth on the stress coefficient is not considered, which needs further studies.

**Key words:** uplift pile with enlarged base; deep embedment; stress around enlarged base; bearing uplift-capacity

## 0 引言

扩底桩被广泛用于抵抗上拔力的工程中, 通过增加少量混凝土用量, 有效提高了抗拔桩的承载力。对于深埋扩底抗拔桩, 桩底扩大头的存在类似于一个锚固端。随上拔位移的增加, 因深埋基础受上覆土体自重及土体边界条件约束, 破坏面不会延伸至地表。抗拔桩桩端扩底的破坏面假设, 大多与传统的锚板相关。关于深埋的锚板基础, Meyerhof 等<sup>[1]</sup>采用了与浅埋基础类似的开口破坏面, 但控制破坏面的高度不会延伸至地表。Ilamparuthi 等<sup>[2]</sup>通过观测砂土中半锚板上拔试验, 得到闭口灯泡状的深埋锚板破坏面。Ghaly 等<sup>[3]</sup>基于试验结果同样认为深埋锚桩的破坏面为闭口灯泡

状, 但仍然采用与 Meyerhof 等<sup>[1]</sup>类似的开口倒圆台破坏面计算其承载力。

与锚板不同, 深埋扩底桩除了需要考虑扩底附近闭口破坏面对应的抗拔承载力, 还需要合理考虑扩底以上一段等截面桩的抗拔作用, 因此不适合采用锚板的无量纲系数来计算承载力。而常规基于开口破坏面的浅埋扩底抗拔桩承载力计算公式也不合理。鉴于此, 郦建俊等<sup>[4]</sup>根据扩底椭圆破坏面假设, 提出了中长扩底抗拔桩的计算模式。在此基础上, 黄茂松等<sup>[5]</sup>结合扩底椭圆破坏面和等截面段指数函数曲线破裂面

收稿日期: 2019-04-30

\*通讯作者 (E-mail: zcrong33@tongji.edu.cn)

(Chattopahyay 等<sup>[6]</sup>), 提出了适用于浅埋和深埋桩底扩大头的不同桩长扩底抗拔桩统一破坏模式。Turner<sup>[7]</sup>指出, 采用极限平衡法计算扩底抗拔桩承载力的关键问题有: 破坏面形状参数和破坏应力类型。对于锚板, 文献[1, 3]更多将关注力放在后者上。而扩底桩的研究, 文献[4]更关注前者。

本文基于已有模型试验的结果, 对扩底附近的应力条件和扩底破坏面的形状参数进行初步论证, 采用统一破坏模式计算砂土中深埋扩底抗拔桩的承载力, 将其用于模型试验的分析。本文的工作希望能为深埋扩底抗拔桩的承载力确定提供一定的参考。

## 1 已有模型试验回顾

### 1.1 锚桩的模型试验

凌巧龙<sup>[8]</sup>开展了松砂中深埋半锚桩基础的抗拔试验, 分别为盘径 100 mm, 桩径 30, 60 和 75 mm 以及桩径 60 mm, 盘径为 100, 150, 200, 250 mm。锚板埋置深度维持 840 mm 不变。具体见图 1。



图 1 模型锚桩<sup>[8]</sup>

Fig. 1 Model anchor-piles<sup>[8]</sup>

试验得到松砂中典型深埋锚桩的破坏面如图 2 所示。可以分为 3 个区域: ①承力盘以上为三角形的“压密核”, 压密核和承力盘看成是一个整体, 以刚体的方式向上运动; ②压密核之外是“应力集中区域”, 该区域内有色砂层被压得最密, 位移最不连续, 塑性应变最大。虽然该文认为基于应力集中区域得到的是圆台型滑裂面。但由图片可见, 在锚板的边缘有明显的砂层不连续, 圆台滑裂面似乎过于保守。而明显的应力集中区域表明深埋锚固端的存在使得锚板破坏面周边土体的法向应力增加明显。如何考虑该法向应力的增加对承载力的影响见后文 3.1 的分析。

### 1.2 扩底抗拔桩的模型试验

Harris 等<sup>[9]</sup>开展砂土中扩底抗拔桩的模型试验, 探讨了松砂和密砂中扩底角度分别为 0°, 20°, 30°, 45°, 60° 和 75° 的抗拔桩的承载特性, 模型桩见图 3。

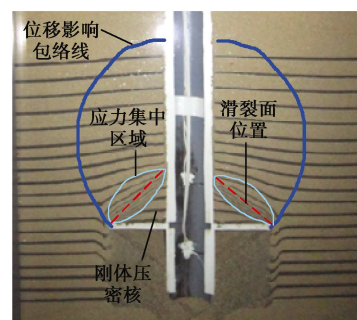


图 2 锚桩破坏示意图<sup>[8]</sup>

Fig. 2 Slip lines of carrying plate<sup>[8]</sup>



图 3 模型扩底桩<sup>[9]</sup>

Fig. 3 Model under-reamed piles<sup>[9]</sup>

文中通过 PIV 技术给出松砂半桩试验中, 扩底角度为 0° 和 45° 时扩底附近土体深埋破坏模式, 见图 4。两个破坏模式的对比发现, 深埋扩底桩破坏面为椭圆状, 破坏区的影响高度随扩底角度增大而减小, 其最大值对应扩底角度为 0° 的锚杆。图 5 为试验得到的

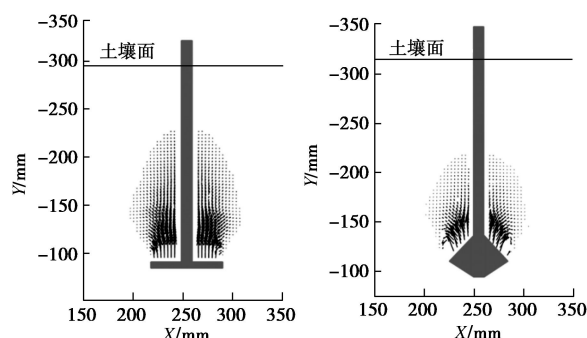


图 4 不同角度的锚板 PIV 矢量图<sup>[9]</sup>

Fig. 4 PIV vector plots of observed failure mechanism<sup>[9]</sup>

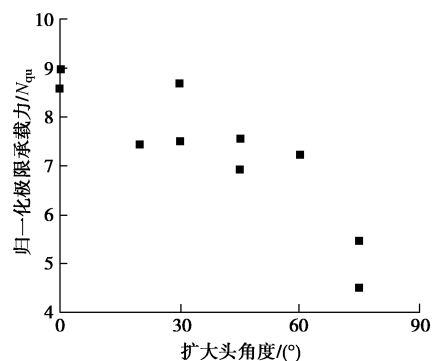


图 5 归一化抗拔承载力与扩底角度的关系

Fig. 5 Uplift capacity against under-ream angle



3.2 模型试验结果的分析

Harris 等<sup>[9]</sup>模型试验中采用的扩底抗拔桩桩径 12.7 mm, 扩底直径 60 mm, 埋置深度 210 mm, 土样为干砂, 相对密实度为  $0.18 \pm 0.03$ , 临界内摩擦角为  $33^\circ$ 。其余参数见文献。鉴于文献给出的试验结果仅有扩底角度为  $0^\circ$  和  $45^\circ$  时的  $H_1$ , 本文对  $20^\circ$  和  $30^\circ$  的结果进行内插,  $60^\circ$  和  $75^\circ$  未进行计算。

根据本文方法以及模型试验得到的抗拔承载力, 反算得到扩底部分应力增强系数  $K_f$  计算结果见表 1。由表可见, 扩底应力的增强系数变化值在 1.3 到 2.7 之间, 比被动土压力系数 3.4 要小。扩底附近土体破坏面的应力增强对扩底角度的变化不敏感。需要注意的是, 模型试验仅有一种埋置深度, 且是 1g 试验, 对地应力的复现有难度, 另外图 5 松砂试验结果离散性较大。考虑实际深埋扩底抗拔桩扩底附近的自重应力和位移约束条件, 破坏面上的应力增强系数  $K_f$  还需进一步的工作, 以得到适用于工程实际的量化结论。

表 1 模型试验计算结果

Table 1 Calculated results of model tests			
扩大头角度/( $^\circ$ )	实测承载力/N	$H_1/d_1$	计算 $K_f$ 值
$0_{①}$	43.70	2.5	2.55
$0_{②}$	45.74	2.5	2.66
20	37.88	2.23	1.37
$30_{①}$	38.24	2.1	1.37
$30_{②}$	44.21	2.1	1.61
$45_{①}$	35.12	1.9	1.45
$45_{②}$	38.54	1.9	1.61

4 结 语

基于已有模型试验的结果, 对扩底附近的应力条件和扩底破坏面的形状参数进行探讨, 采用统一破坏模式计算砂土中深埋扩底抗拔桩的承载力, 将其用于模型试验的分析。本文的工作只是尝试性的初步探索, 在确定深埋扩底椭圆破坏面影响高度和土体法向应力增强系数方面, 还需要进行更加深入的研究, 以期为实际工程扩底抗拔桩承载力的计算提供依据。

参考文献:

[1] MEYERHOF G G, ADAMS J I. The ultimate uplift capacity of foundations[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1968, 5(4):

225 - 244.  
[2] ILAMPARUTHI K, MUTHUKRISHNAIAH K. Anchors in sand bed: delineation of rupture surface[J]. Ocean Engineering, 1999, 26: 1249 - 1273.  
[3] GHALY A, HANNA A, HANNA M. Uplift behavior of screw anchors in sand I: dry sand[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1991, 117(5): 773 - 793.  
[4] 郦建俊, 黄茂松, 王卫东, 等. 软土地基中扩底抗拔中长桩的极限承载力分[J]. 岩土力学, 2009, 30(9): 2643 - 2650. (LI Jian-jun, HUANG Mao-song, WANG Wei-dong, et al. Analysis on uplift capacity of long enlarged-base pile in soft soil ground[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(9): 2643 - 2650. (in Chinese))  
[5] 黄茂松, 王向军, 吴江斌, 等. 不同桩长扩底抗拔桩极限承载力的统一计算模式[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(1): 63 - 69. (HUANG Mao-song, WANG Xiang-jun, WU Jiang-bin, et al. A unified approach to estimating ultimate bearing capacity of uplift pile with enlarged base[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(1): 63 - 69. (in Chinese))  
[6] CHATTOPADHYAY B C, PISE P J. Uplift capacity of piles in sand[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1986, 112(9): 888 - 904.  
[7] TURNER E. Uplift resistance of transmission tower footing[J]. Journal of the Power Division, ASCE, 1962, 88(2): 17 - 34.  
[8] 凌巧龙. 异形抗拔桩承载特性的模型试验与计算分析[D]. 上海: 同济大学, 2014. (LING Qiao-long, Model test and calculation analysis of bearing characteristics of special-shaped uplifting pile[D]. Shanghai: Tongji University, 2014. (in Chinese))  
[9] HARRIS D E, MADABHUSHI G S P. Uplift capacity of an under-reamed pile foundation[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering, 2015, 168(6): 526 - 538.  
[10] ILAMPARUTHI K, DICKIN E Z, MUTHUKRISHNAIAH K. Experimental investigation of the uplift behavior of circular plate anchors embedded in sand[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, 39(3): 648 - 664.

(责编: 黄贤沙)