

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^{1, 2}, 张陈蓉^{*1, 2}, 黄茂松^{1, 2}, 杨学林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. 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^{1, 2}, ZHANG Chen-rong^{1, 2}, HUANG Mao-song^{1, 2}, YANG Xue-lin³

(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^[1]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^[2]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^[3]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^[1]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所对应的抗拔承载力, 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, 郎建俊等^[4]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^[5]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)

(Chattopahayy 等^[6]), 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^[7]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^[8]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^[8]

Fig. 1 Model anchor-piles^[8]

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^[9]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。

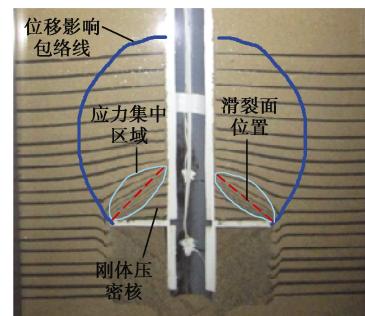


图 2 锚桩破坏示意图^[8]

Fig. 2 Slip lines of carrying plate^[8]



图 3 模型扩底桩^[9]

Fig. 3 Model under-reamed piles^[9]

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

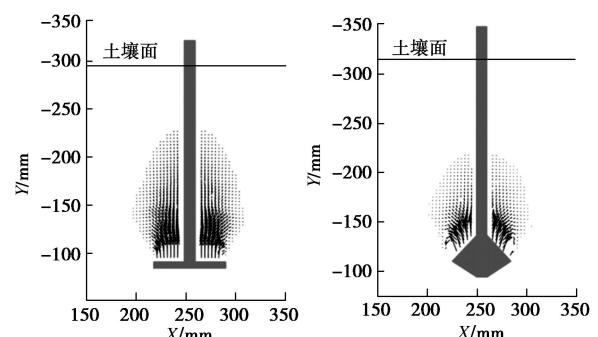


图 4 不同角度的锚板 PIV 矢量图^[9]

Fig. 4 PIV vector plots of observed failure mechanism^[9]

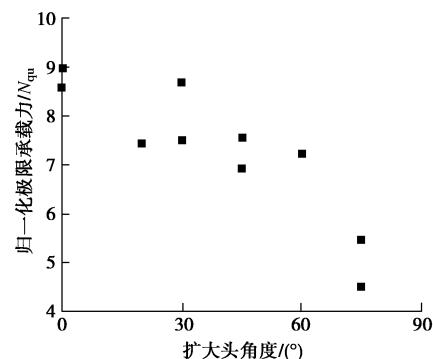


图 5 归一化抗拔承载力与扩底角度的关系

Fig. 5 Uplift capacity against under-ream angle

抗拔承载力系数与扩底角度的关系。由图可见, 松砂中抗拔桩承载力随扩底角度增加而减小。

本节根据松砂中锚桩和扩底抗拔桩的模型试验, 分别陈述了深埋锚桩附近的应力增强现象和深埋扩底桩扩底破坏面影响高度随扩底角度变化的情况。下面简单介绍扩底抗拔桩的统一破坏模式, 以及如何在极限分析中考虑上述两个影响因素。

2 计算模型

扩底桩几何尺寸和坐标轴位置见图 6, d 为等截面段直径, d_1 为扩底直径, H_0 为扩大头高度, L 为桩长。在极限上拔荷载作用下, 扩底桩的桩土破坏模式假设如下: 桩底扩大头附近为局部椭圆滑裂破坏面, 剩余等截面段为 Chattopahayy 等^[6]的指数函数曲线破裂面。极限抗拔承载力由桩身自重、破裂面内土体自重以及破裂面上土体极限摩阻力的竖向分量组成。令 H_1 为桩底扩大头椭圆滑裂面的影响高度, 计算扩底抗拔桩承载力, 需要将计算区域沿桩长分成 3 部分: ① 扩大头段, 桩长 $0 \sim H_0$; ② 扩大头影响等截面段, 桩长 $H_0 \sim H_1$; ③ 等截面段, 桩长 $H_1 \sim L$ 。

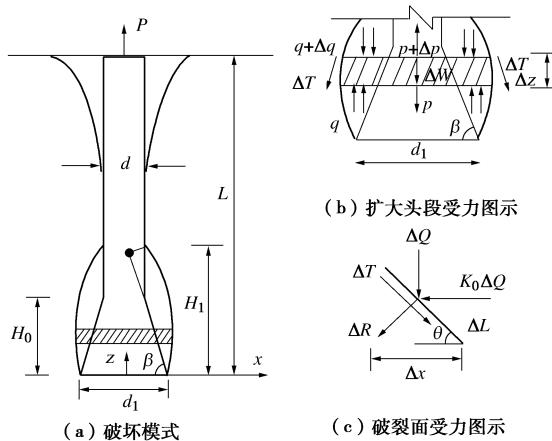


图 6 扩底抗拔桩破裂面

Fig. 6 Failure surface of uplift belled pile

扩大头周边局部椭圆破坏面为 1/4 椭圆面, 破坏面的数学表达式见参考文献[4]。Chattopahayy 等^[6]给出的等截面段指数函数形式的破坏面与桩的柔度系数 L/d , 土体摩擦角 φ 和桩土界面摩擦系数 δ 有关。其数学表达式限定了破坏面最深处与桩侧相切, 桩顶处破坏面与水平面角度为 $\pi/4 - \varphi/2$, 桩长无限时桩顶破坏面的最大水平范围为定值, 具体见参考文献[6]。

分析破坏面上的土体应力条件, 具体见图 6 (c), 破坏斜面 ΔL 上土体的摩阻力 ΔT 可表示为

$$\Delta T = \Delta R \cdot \tan \varphi , \quad (1)$$

式中, ΔL 为倾斜微段的长度, c 为土体的黏聚力。 ΔR 为破坏面微段上的法向应力。文献[4]中定义其为

$$\Delta R = \Delta Q \cos \theta + K \Delta Q \sin \theta , \quad (2)$$

式中, $\Delta Q = \bar{\gamma}_s (L - z - \Delta z / 2) \Delta L$, $\bar{\gamma}_s$ 为非均质地层中至该深度处土体的加权平均重度。 K 为土体的水平侧压力系数, 建议取值为静止土压力系数 K_0 。

根据图 6 (b) 的扩大头段受力分析图, 考虑其竖向平衡条件, 可得到

$$\begin{aligned} P_1 + \Delta P_1 + q\pi[x^2 - (d_1/2 - z \cot \beta)^2] \\ = P_1 + (q + \Delta q)\pi[(x + \Delta x)^2 - (d_1/2 - z \cot \beta - \Delta z \cdot \cot \beta)^2] + \\ \Delta W + 2\pi(x + \Delta x/2)\Delta T \cdot \sin \theta . \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)略去高阶无穷小量, 得到扩大头段桩身轴向应力的微分表达形式 dP_1/dz 。与此类似, 分别得到扩大头影响等截面段和指数破坏面等截面段的 dP_2/dz 和 dP_3/dz 微分表达式。对沿桩长的 3 个计算区域进行积分并求和, 扩底抗拔桩的拔承载力计算表示式为

$$P_u = \int_0^{H_0} \frac{\partial P_1}{\partial z} dz + \int_{H_0}^{H_1} \frac{\partial P_2}{\partial z} dz + \int_{H_1}^L \frac{\partial P_3}{\partial z} dz . \quad (4)$$

3 对深埋扩底抗拔桩模型试验的分析

3.1 计算模型参数的确定

若桩周土体处于天然状态, 土体竖向和水平向的应力状态为 $(\bar{\gamma}z, 0)$ 和 $(K_0\bar{\gamma}z, 0)$ 。上节中式(1)和(2)基于该应力条件确定扩底面上的法向应力, 结合强度线计算极限摩阻力, 见图 7 中 A 点。

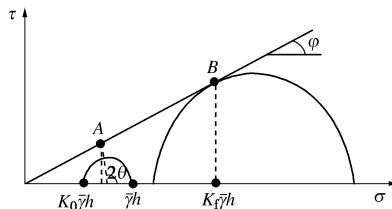


图 7 莫尔应力圆分析

Fig. 7 Analysis of Mohr circle stress

对于深埋扩底桩的扩大头部分, 破坏面上土体的应力圆直径变大, 中心点右移, 摩尔圆与强度线相切, 见图 7 中 B 点。显然, 不考虑扩底部分的应力条件, 得到的扩底部分椭圆破坏面的影响高度会比实际情况偏大很多。故引入应力增强系数 K_r 考虑椭圆破坏面上的法向应力, 具体表达式为

$$\Delta R = K_r \Delta Q . \quad (5)$$

Ilamparuthi 等^[10]给出的深埋锚板灯泡状破坏面高度与锚板直径比值为 2.8。Ghaly 等^[3]依据锚板抗拔试验结果认为松砂中该值为 4.0。Meyerhof 等^[1]基于锚板试验, 建议 $\varphi = 30^\circ$ 时该值为 4。根据图 4 Harris 等^[9]的试验得到当扩底角度为 0° 和 45° 时, 该比值分别为 2.5 和 1.9。2.5 与上文 2.8 较为接近。

3.2 模型试验结果的分析

Harris 等^[9]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 ± 0.03 , 临界内摩擦角为 33° 。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° 和 45° 时的 H_1 , 本文对 20° 和 30° 的结果进行内插, 60° 和 75° 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/(°)	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] 郎建俊, 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)