

抗滑桩桩后土拱形状及影响因素

吕庆, 孙红月, 尚岳全

(浙江大学 建筑工程学院, 杭州 310058, lvqing@zju.edu.cn)

摘要: 为描述抗滑桩桩后土拱的形状, 采用平面应变有限元模型, 通过搜索数值计算结果中最大主压应力迹线, 拟合土拱轴线的描述方程, 分析桩间距、土体参数、桩土界面参数、桩后荷载等因素对拱高和拱跨的影响规律, 提出考虑上述因素的土拱轴线形状方程. 结果表明: 桩间距和桩后土压力大小对土拱形状影响最大. 土拱跨高比与桩间距呈二次正相关关系, 在桩间距为 4.46 倍桩直径时, 土拱受力最为有利. 随着桩后土压力增加, 土拱拱高呈陡降形对数函数变化规律, 反映了土拱从形成-发展-破坏的演变规律.

关键词: 抗滑桩; 土拱效应; 土拱形状; 数值模拟; 合理桩间距

中图分类号: TU431

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)04-0629-05

Shape of soil arch behind anti-slide piles and its major influence factors

LÜ Qing, SUN Hong-yue, SHANG Yue-quan

(College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China, lvqing@zju.edu.cn)

Abstract: In order to describe the shape of soil arch behind anti-slide piles, numerical simulations were carried out based on plane strain FEA models. Maximum principal compressive stress traces were investigated based on the calculated results and arch axis equations were set up by fitting analysis. The influences of major factors such as pile space, soil and pile-soil interface parameters, load magnitude on the arch shape were analyzed, and the equation with consideration of aforementioned factors was finally obtained. The results show that pile space and the magnitude of pressure on piles are the most notable factors affecting the arch shape. Ratio of span to rise of arch has a quadratic correlation with pile space. Arch effect will bring soil strength into full use as the pile space is 4.46 times of diameter. Arch rise drops as a steep dropping logarithmic function curve with the increase of pressure, which reflects the evolutionary process of arch effect from formation to development and destruction.

Key words: anti-slide pile; soil arch effect; shape of soil arch; numerical simulation; proper pile space

抗滑桩桩后土体的拱效应是滑坡加固工程中重要的力学现象. 对认识桩后土体的应力传递规律, 分析桩土相互作用机理, 优化桩的布设方案具有重要的理论和实践意义. 目前, 对土拱效应的研究主要集中在 3 个方面: 一是土拱形成机理的研究, 主要借助模型试验、理论分析和数值模拟等方法对桩土相互作用机理、滑坡剩余下滑力的传递

及分配规律等问题进行研究^[1-2]. 二是通过土拱原理建立数学或数值模型, 分析合理桩间距, 桩的极限承载力及加固后边坡的整体稳定问题^[3]. 第三方面集中在影响土拱效应的参数研究方面, 包括桩径、桩间距、桩周土参数、本构模型等对土拱效应及桩土应力分担比的影响规律研究^[4]. 上述工作为土拱形状的进一步研究奠定了基础.

从土力学的观点看, 土拱效应实质上反映了土体充分发挥自身抗剪强度、调整内部应力分布的受力机制. 其形状在宏观上反映了土拱的受力特征. 有研究者按照合理拱轴线的思路求解土拱的形状方程, 并将其用于确定抗滑桩的合理桩间

收稿日期: 2008-12-27.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40672185); 中国博士后科学基金资助项目(20070421201).

作者简介: 吕庆(1978—), 男, 博士后;
尚岳全(1958—), 男, 教授, 博士生导师.

距^[6-8]. 由于未能考虑土体塑性变形和应力偏转的影响,这一方法得到的实际上是理想化了的土拱形状的结构力学解. 这在理论上是不完善的,实践中也需要进一步的检验.

本文另辟蹊径,利用土拱是土体中最大主压应力轨迹线^[4,9]的观点,在数值分析的基础上,研究土体中的最大主压应力的分布规律,并通过拟合分析,建立土拱形状的描述方程. 对影响土拱形状的主要因素进行定量计算,最终得出考虑这些因素影响规律的土拱形状描述方程.

1 计算模型及验证

在建立分析的数值模型时,主要考虑了如下几个问题.

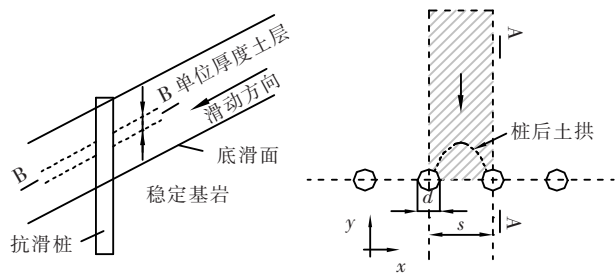
土体的本构模型采用基于摩尔-库伦屈服准则和关联流动法则的理想弹塑性模型(简称 M-C 模型).

桩土界面采用无厚度接触单元模拟. 单元法向刚度 K_n 在保证计算收敛的前提下,通过试算尽量采用较大值,以减少接触单元的穿刺位移,提高计算精度. 切向刚度 K_s 依据相邻土体的剪切模量按照 $K_s = \alpha G/l$ 来确定^[3],其中: G 为相邻土体的剪切模量; l 为接触单元的长度; α 为调整系数,一般取 $\alpha = 20$ 就能足够精确地描述侧向受荷桩的荷载位移关系.

接触界面的本构关系采用库仑摩擦模型描述. 桩土界面的室内剪切试验表明,在界面土体屈服前,桩土界面的相对滑动位移几乎为零^[5]. 因此,桩土界面的应力应变关系可以近似看成刚塑性关系. 库仑摩擦模型可模拟上述关系:在发生相对滑动前,相互接触的两边都可以承受一定的切向剪应力. 当切向剪应力超过极限剪应力时,接触单元两边发生相对滑动.

采用平面应变有限元模型进行分析. 选取地表以下一定深度单位厚度的土层作为分析对象,如图 1 所示. 将土层的位移限定在水平方向上,同时约束桩体水平位移为零,将桩视为完全刚性. 利用对称性,采用一倍桩间距作为有限元模型的分析对象. 图 1 中 d 为桩直径, s 为桩中心距. 对称边界采用 x 向光滑位移约束.

模型的前后边界取 $30d$ 长. 通过在桩后边界上设置 y 向的初始位移模拟不稳定土体的滑动变形. 抗滑桩和土体采用 6 节点三角形划分网格. 网格密度在抗滑桩及其桩周附近用较密,两端边界处较疏,中间区域均匀过渡.



(a)纵切图(A-A)

(b)横切图(B-B)

图 1 土拱形状分析的平面应变模型

为检验上述模型的正确性,对其进行验证. 依据如下, Baguelin 等^[10] 得出理想粗糙条件下圆截面侧向桩弹性阶段的荷载位移关系为: $p = 4.32G(\delta/d)$. 其中, p 为桩上的侧向作用力; G 同上; δ 为桩土相对位移; d 为桩的直径. Randolph 等^[11] 研究不同桩土粘结条件下侧向受荷桩的极限压力问题时,获得了理论上的精确解. 对圆截面桩,桩土界面为理想光滑时,单桩的极限压力为 $9.14c_u((6 + \pi)c_u)$; 在桩土界面为理想粗糙时,单桩的极限压力为 $11.94c_u((4\sqrt{2} + 2\pi)c_u)$, 其中 c_u 为土体的不排水抗剪强度. Kooijman、Vermeer^[12] 和 Ng 等^[13] 通过数值方法验证了上述结论.

本文在上述模型基础上,分析了两种理想桩土界面条件下桩的荷载-位移曲线,并和上述理论结果比较. 取 $d = 1$ m. 对理想光滑的情况,取桩土接触界面的 c 和 φ 均为零;对于理想粗糙的情况,取 $c = 500c_u$, $\varphi = 0$. 结果表明,无论是光滑接触还是粗糙接触,计算结果均与理论值非常接近,验证了本文采用的计算方法和模型的可靠性.

2 基于有限元法的土拱形状研究

很多学者都认为,土体中沿最大主应力方向的迹线就是土拱轴线,甚至有人将土拱称为“大主应力拱”. 这些研究给本文提供了思路:在数值分析的基础上,搜索土体中最大主压应力的分布规律并以此作为土拱的轴线,然后在应力计算的基础上,通过拟合分析,建立不同桩间距条件下土拱形状的描述方程.

图 2 是不同桩间距下,土拱形状的计算结果. 图中数据由不同位置竖向剖面上最大主压应力的计算值确定. 按照抛物线方程对这些典型数据进行拟合分析,得到不同桩间距条件下最大主压应力的拟合方程. 图中拟合相关系数 R^2 均接近 1,说明用抛物线方程拟合桩后最大主压应力的数据是合适的.

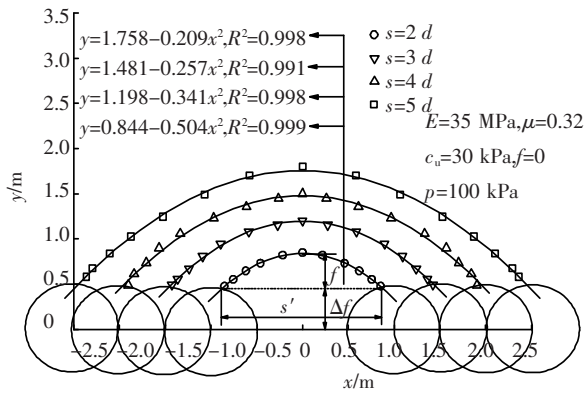


图2 不同桩间距下土拱的形状

将拟合分析获得的方程标准化处理,得

$$y = a + bx^2 \quad (1)$$

对式(1)进行坐标变换,可得系数 a 、 b 与拱高 f 和拱跨 s' 之间的数学关系,即

$$a = f + \Delta f, \quad (2)$$

$$b = \frac{4f}{s'^2} \quad (3)$$

式中: s' 为土拱拱跨; f 为土拱拱高, Δf 为土拱拱脚距桩中心连线的垂直距离,见图2。

由上述关系进一步分析系数 a 、 b 与桩间距的相关关系。结果表明, a 与 s/d 呈线性正相关关系, 且和 f 的变化规律一致, 两者相差一个常数项 Δf 。 b 随 s/d 的增加呈幂函数的变化规律。如图3所示。

所以拱轴线方程可以统一写成如下形式:

$$y = -0.982 \left(\frac{s}{d}\right)^{-0.963} x^2 + 0.3025 \frac{s}{d} + 0.2614 \quad (4)$$

土拱拱高 f 和拱跨 s' 是土拱形状中的主要参数。图4为桩后土拱的 f 、 s' 及跨高比 s'/f 与 s/d 的关系。由图可见, 土拱的 f 、 s' 均与 s/d 呈线性正相关关系。而 s'/f 随 s/d 的增大先减小后逐渐增加。

跨高比 s'/f 反映了土拱的整体形状特征。从

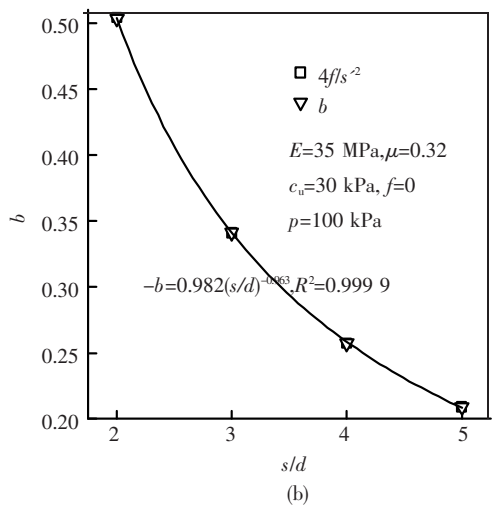
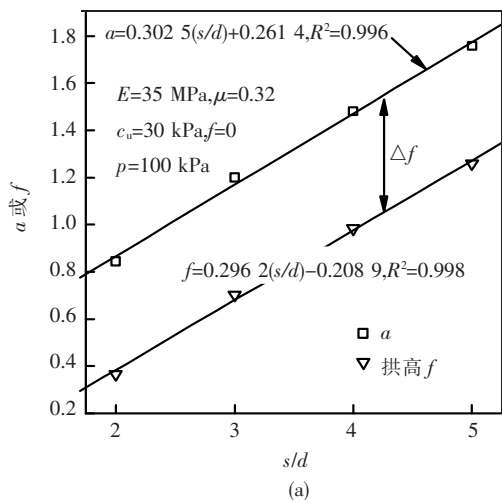


图3 参数 a 、 b 和桩间距的关系

受力上看, s'/f 越大, 土拱越趋于平缓; 反之, s'/f 越小, 土拱越陡峭, 土拱的受力越体现受压的特征, 对土拱拱体结构的受力越有利。由图4可见, 计算获得的 s'/f 随着 s/d 增大先减小后逐渐增加, 极值拐点出现在 $s/d = 4.468$ 。由于土体材料的抗压强度远大于其抗拉强度, 平缓的拱形对其受力不利。因此, 为充分发挥桩后土体的拱效应, 桩的间距不宜太小, 也不应太大。从上述计算分析的结果看取 4~5 倍桩径较为合适。

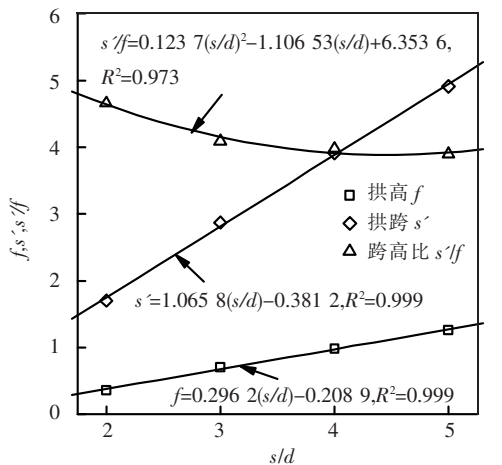


图4 拱高、拱跨及跨高比与桩间距的关系

3 土拱形状的主要影响因素

为考虑土体和桩土界面特性及荷载大小的影响, 进一步研究了这些参数变化对于土拱形状的影响。结果表明, 土体的 c 、 φ 值对土拱的影响规律与土拱所处的受力变形阶段有关。在桩土间相对位移较小时, 土体材料参数变化对土拱的形状影响很小。究其原因主要是在桩土相对位移较小时,

桩周土还处于弹性变形或塑性变形开始阶段,而 c 、 φ 值主要反映土的塑性变形,因此,土拱形状对土体参数变化不敏感.

同样,桩土界面参数变化(主要是摩擦系数 μ 变化)在桩土相对变形较小的情况下,对桩后土拱形状的影响也很小.在桩土相对位移增大时,也只对拱脚的位置(即 Δf 的值大小)有很小的影响,而对土拱的拱高、拱跨及整体形状几乎没有影响.

对土拱形状影响较大的是桩后荷载的大小.图5是不同荷载作用下,土拱拱高 f 的变化规律.图中横坐标为作用于桩上压力值 p 与桩的极限压力 p_u 的比值,纵坐标为一般情况下土拱拱高 f 与桩后土压力为 100 kPa 时拱高 f_{100} 的比值.经归一化处理,由图中数据可见,在桩后荷载变化时,不同桩间距 s 的 f/f_{100} 具有较为一致的变化规律.对这些数据进行拟合分析,结果表明,随着桩后土压力作用的增加, f 呈陡降形对数函数的变化规律.

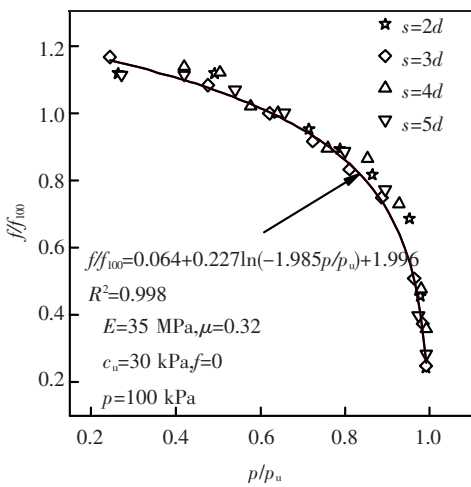


图5 桩后荷载对土拱拱高 f 的影响

进一步分析:在 $p/p_u < 0.5$ 时,可认为桩周土基本为弹性变形,土拱处于形成期,拱高随着荷载的增加呈线性减小的变化规律.当 $0.5 < p/p_u < 0.9$ 时,桩周土局部发生塑性变形,塑性区域逐渐扩大,土拱处于塑性变形发展期,拱高随荷载增加逐渐表现出非线性的变化特征.当 $p/p_u > 0.9$ 时,土拱处于塑性破坏期,拱高随荷载增加而急剧减少,表现为图5中曲线的陡降段.可见,荷载变化对拱高的影响规律反映了抗滑桩桩后土拱从形成—发展—破坏的变化过程.

依上述方法,同样可得出式(1)中系数 b 与荷载的关系,即

$$-b/-b_{100} = 1.065 + 0.227 \ln(-1.972 p/p_u + 1.983). \quad (5)$$

式中, $-b/-b_{100}$ 表示一般情况下系数 b 和桩后土压力为 100 kPa 时系数 b_{100} 的比值,横坐标同图5.可见,荷载对 b 的影响规律和对 f 的影响规律基本一致,这是因为荷载对土拱拱脚位置的影响很小,若忽略,即认为荷载对 s' 无影响,由式(3)可见, b 与 f 应是线性相关的.按式(1)分析, b 的绝对值越大则土拱的形状越陡;反之,则越平缓.因此, b 随着荷载增加,呈陡降形对数函数的变化规律,说明随着荷载的增加,土拱的形状越趋于扁平,直至破坏时接近于平拱,如图6所示.

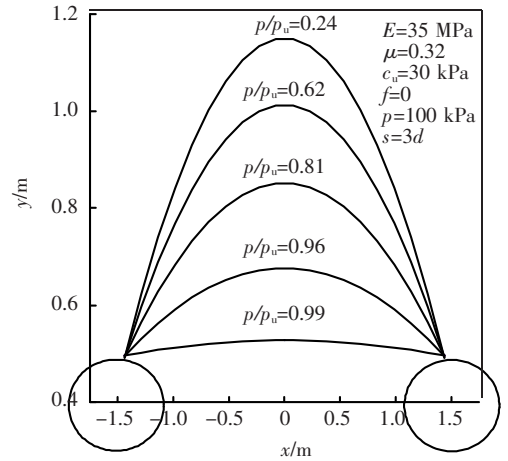


图6 荷载变化对土拱形状的影响

综合上面的分析,根据桩后荷载对桩后土拱形状的影响规律及拟合分析的结果,对式(4)作进一步完善,并考虑荷载大小的影响,可得

$$y = -0.982 \left(\frac{s}{d} \right)^{-0.965} [1.065 + 0.227 \ln(-1.972 p/p_u + 1.983)] x^2 + \left(0.3025 \frac{s}{d} + 0.2614 \right) \cdot [1.064 + 0.227 \ln(-1.985 p/p_u + 1.996)]. \quad (6)$$

式(6)是在一定数量数值模型的基础上,通过计算和拟合分析获得的带有一定统计经验性质的桩后土拱拱轴形状的估算公式.该式综合考虑了桩间距、桩后荷载大小等因素的影响规律,可用来解释土拱发挥与合理桩间距的关系;同时能反映随着荷载的增加抗滑桩桩后土拱从形成—发展—破坏的变化规律.

4 结论

1)通过对数值分析结果搜索土体最大主压应力迹线的方法建立土拱轴线的方程.结果表明:桩间距和桩后荷载大小对土拱形状影响最大.土

拱跨高比与桩间距呈二次正相关关系,在桩间距为4.46倍桩直径时,土拱受力最为有利.随着桩后土压力增加,土拱拱高呈陡降形对数函数变化规律.

2)由于综合考虑了桩间距、土体材料参数和桩土界面参数、土压力荷载大小等因素对土拱形状的影响,本文提出的拱形方程具有一定的适用性.可为确定合理的桩间距及认识土拱的发育演化规律提供参考.

3)应该指出,土拱效应的作用机理是一个复杂的岩土力学问题,涉及诸多因素且关系复杂,受现有研究手段和试验条件的限制,目前仍有一些理论问题值得探讨.包括土拱的形成条件和作用方式、土拱作用的微观机理等.本文仅对土拱形状作了初步探讨,更深入的研究仍需在大量试验和数值分析的基础上继续进行.

参考文献:

- [1] BOSSCHER P J, GRAY D H. Soil arching in sandy slopes [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1986, 112(6): 626 - 645.
- [2] 杨明, 姚令侃, 王广军. 桩间土拱效应离心模型试验及数值模拟研究[J]. *岩土力学*, 2008, 29(3): 817 - 822.
- [3] CAI Fei, UGAI K. Numerical analysis of the stability of a slope reinforced with piles[J]. *Soils and Foundations*, 2000, 40(1): 73 - 84.
- [4] LIANG R, ZENG S. Numerical study of soil arching mechanism in drilled shafts for slope stabilization[J]. *Soils and Foundations*, 2002, 42(2): 83 - 92.
- [5] KISHIDA H, UESUGI M. Tests of the interface between sand and steel in the simple shear apparatus [J]. *Geotechnique*, 1987, 37(1): 45 - 51.
- [6] 周德培, 肖世国, 夏雄. 边坡工程中抗滑桩合理桩间距的探讨[J]. *岩土工程学报*, 2004, 26(1): 132 - 135.
- [7] 周应华, 周德培, 冯君. 推力桩桩间土拱几何力学特性及桩间距的确定[J]. *岩土力学*, 2006, 27(3): 455 - 457.
- [8] 贾海莉, 王成华, 李江洪. 关于土拱效应的几个问题[J]. *西南交通大学学报*, 2003, 38(4): 398 - 402.
- [9] CHEN C Y, MARTIN G R. Soil - structure interaction for landslide stabilizing piles [J]. *Computer and Geotechnics*, 2002, 29: 363 - 386.
- [10] BAGUELIN F, FRANK R, SAID R H. Theoretical study of lateral reaction mechanism of piles [J]. *Geotechnique*, 1977, 27(3): 405 - 434.
- [11] RANDOLPH M F, HOULSBY G T. The limiting pressure on a circular pile loaded laterally in cohesive soil [J]. *Geotechnique*, 1984, 34(4): 613 - 623.
- [12] KOUIJMAN, A P, VERMEER P A. Elastoplastic analysis of laterally loaded piles [J]. *Proc 6th Int Conf on Numer Meth Geomech Innsbruck*, 1988, 2: 1033 - 1042.
- [13] NG P C F, PYRAH I C, ANDERSON W F. Assessment of three interface elements and modification of the interface element in CRISP90 [J]. *Computers and Geotechnics*, 1997, 21(4): 315 - 319.

(编辑 刘 彤)