

深基坑挡土桩土拱效应特征分析

刘建民, 程小彬

(西北工业大学力学与土木建筑学院, 陕西 西安 710072)

摘要:土拱效应是挡土桩工作原理的基础。采用有限元法首先研究了一个真正土拱的受力特征, 以此为基础, 分析了深基坑挡土桩后土体的受力状态; 指出挡土桩后的土体可以分为 3 个区域: 拱底应力区、土拱区和拱顶均匀应力区。在拱底应力区, 最大主应力为拉应力; 在土拱应力区, 其受力特征与真正的土拱相同。给出了这 3 个区域的分界线特征, 并讨论了荷载及挡土桩净距等因素对土拱区形状的影响。

关键词:挡土桩; 深基坑; 土拱; 效应特征; 有限元分析

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2007)01-0004-04

Feature Analysis on Soil Arching Effect of Retaining Piles for Deep Foundation Pit/LIU Jian-min, CHENG Xiao-bin (Civil engineering Department, Northwest Polytechnic University, Xi'an Shanxi 710072, China)

Abstract: Soil arching effect is the basis for retaining piles. In this paper, FEM is first used in the study of stress and deformation for a real soil arch, and then based on it, stress and deformation condition behind retaining piles for deep pit is analyzed. The soil behind retaining piles can be divided into 3 region: (1) the region under soil arch, (2) soil arching region, (3) uniform stress zone in crown arch. In region (1), the maximum principal stress is tensile stress; the stress state in region (2) is the same with that of the real soil arch. The boundary of these 3 regions is studied. The influence on the structure of soil arching region by loading and clear space of retaining piles is also discussed.

Key words: retaining piles; deep foundation pit; soil arch; effect character; FEM analysis

挡土桩是深基坑支护、土坡防滑等工程的基本设施, 而土拱效应原理则是其在这些领域得以应用的基础。Terzaghi^[1]曾通过试验证实了土拱现象的存在。目前的研究主要有 2 种方法: 数值分析方法及解析方法。由于数值分析方法的灵活性, 使得人们能对这种现象较为深入的探讨^[2-5], 而解析方法则主要应用土体的静力平衡条件确定抗滑桩间距等参数^[6-8]。关于土拱区的特征, 目前的论述很多, 如: 土拱区内土体的大小主应力方向没有发生旋转, 且没有发生应力渗入, 土体仍处于弹性状态^[2]; 桩后附近各土层单元的大主应力连线便是拱形, 对于土坡阻滑桩, 用阻滑桩连线平面上桩及土体所承担的荷载比例作为土拱效应的描述指标^[3]; 阻滑桩后存在一拱形的等位移区, 土拱即在该区域形成^[4]; 垂直于挡桩平面的竖向应力的分布情况说明土拱的存在^[5]。目前的研究大都是针对土坡阻滑桩的, 对土拱区特征的深入探讨尚很少; 对深基坑挡土桩土拱问题的研究更少。而深基坑挡土桩在某种程度上可以看作是土坡阻滑桩问题的一种保守简化。笔者在前人工作的基础上, 利用有限元方法(ANSYS8.0 平台)对该问题进行探讨。

1 土拱的受力及变形特征

为研究土拱的受力特征, 本文先取一真正的拱形土体, 其在拱脚处受到挡土桩作用的情形来研究。为研究上的方便, 取挡土桩为矩形截面, 土与桩之间按照光滑接触处理; 参考文献[2~4]的方法, 桩后土体按平面应变问题考虑。建立计算模型如图 1, 在计算时, 认为挡土桩为刚性体, 无位移; 桩土接触面在法向无位移, 模型的上下两个面在法向无位移, 拱曲线的对边承受均布荷载, 其值分别为 10、30、50 kPa。土体的参数为: 弹性模量 $E = 2000$ kPa, 泊松比 $\nu = 0.35$, 内摩擦角 $\varphi = 22^\circ$, 粘聚力 $c = 15$ kPa。计算采用 Mohr - Column 强度理论。

有限元分析发现:

- (1) 在拱顶区域内, 不存在拱形的等位移区(见图 2 所给出的位移云图)。
- (2) 在拱顶处一定范围内, 主应力迹线确实成拱形, 但较远处为均匀应力分布(图 3)。
- (3) 在拱顶区域内, 水平向应力 σ_x , 两个主应力 σ_1 、 σ_3 均为压应力。
- (4) 土拱的塑性区首先产生于拱脚, 随荷载的增大而逐渐向拱的弧形部分的顶部扩展。

收稿日期: 2006-09-12

作者简介: 刘建民(1962-), 男(汉族), 陕西户县人, 西北工业大学副教授, 结构工程专业, 博士, 从事建筑结构、施工技术的教学与科研工作, 陕西省西安市, 13609282836, liujm1@sina.com。

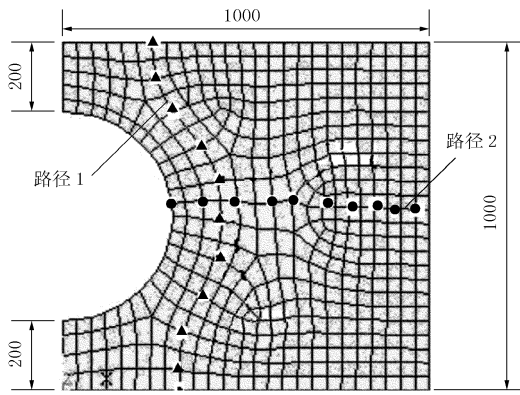


图 1 土拱计算模型

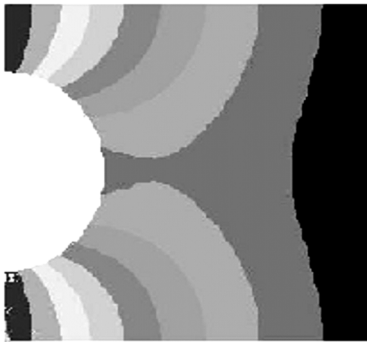


图 2 水平向位移场云图

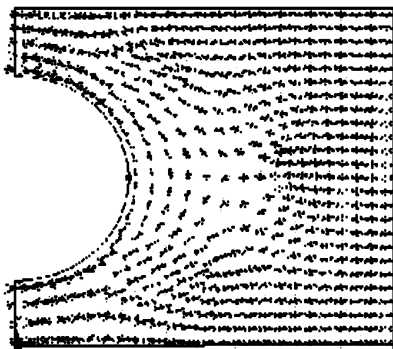


图 3 主应力迹线图

(5) 如果选取如图 1 中所示的路径 1、2 来研究(因篇幅,此处未给相关曲线),则:

沿着路径 1:最小主应力 σ_3 及水平向应力 σ_x 都在拱顶部最小,在两侧最大,呈马鞍型分布;最大主应力 σ_1 的分布呈 W 形;拱顶部最大,随着向两边靠近而逐渐减小至最小,然后又逐渐增大。

沿着路径 2:最大主应力 σ_1 及水平向应力 σ_x 由拱顶向远处均逐渐增大;而水平向位移 u_x 由拱顶向远逐渐减小,在距离拱顶某一较小距离处取得最小值,然后一直单调增大。

根据上述真正土拱的受力及变形特征,下面讨论深基坑挡土桩后土体土拱的特征。

2 深基坑挡土桩的土拱效应研究

2.1 计算模型

该问题本是一个三维问题,同上,本文也将其简化为二维平面应变问题。深基坑工程中,各挡土桩之间若不加挡土板,则土的自由面应与桩在基坑中的外露面相平;但由于排水、干燥、扰动等因素,桩在竖向两个侧面土体通常会与桩体脱开,且经常因扰动而疏松。因此,如上所述,不考虑该两侧土体的作用。文献[2、3]指出,土桩接触面性质对土拱效应影响很大,接触面越粗糙,土拱效应越显著;作为一种保守的考虑,本文假定桩土接触面完全光滑。由以上假定,本文的计算模型如图 4 所示。初步分析时,土体的力学参数同表 1,挡土桩 $d=0.4\text{ m}$,桩间净距 $s=0.6\text{ m}$,桩后土体的计算长度取 $L=0.4\text{ m}$ (确定 L 的原则:在本文所分析的各种桩距下,应使得模型远端存在一定均匀应力区),荷载 $p=30\text{ kPa}$ 。

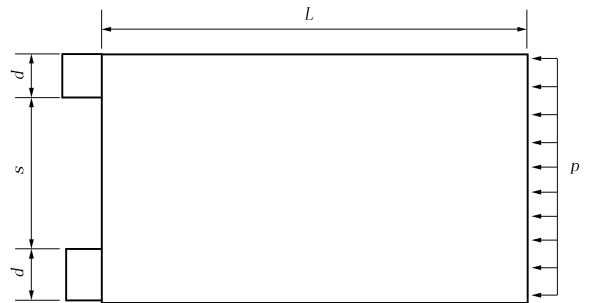


图 4 深基坑挡土桩土体计算模型

2.2 挡土桩后土体的力学特征

对该模型进行有限元分析,可以发现:

(1)图 5 给出了挡土桩后土体水平位移场的云图,从中可以看出,在整个土体内,不存在拱形的等位移区。

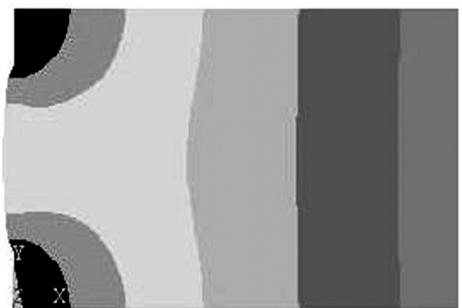


图 5 挡土桩后的水平位移场云图

(2)图 6 给出了挡土桩后土体的主应力迹线图。可以看到,图 6 中的应力分布可以分成 3 个区域:在最右侧中间部位,主应力迹线为水平或垂直的区域;在该区域右侧相邻,有一个与真正土拱顶部主

应力迹线分布相似的区域;而最左侧主应力迹线为水平(垂直)向的区域。我们称其分别为应力拱拱底区域、应力拱拱部区域和应力拱顶部均匀应力区域。

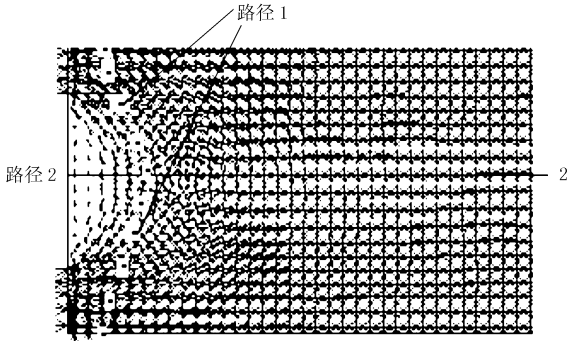


图 6 桩后土体的主应力迹线

(3)在最左侧的应力拱底部区域, σ_1 为拉应力。

(4)同真正的土拱应力场,在应力拱拱部区域,水平向应力 σ_x , 2 个主应力 σ_1 、 σ_3 均为压应力。限于篇幅,此处不再给出相关的应力场云图或数据。

在该区域内,取与图 1 相似的两条路径(如图 6 所示);图 7 给出了沿路径 1 的 σ_1 、 σ_3 、 σ_x 分布图;图 8 给出了沿路径 2 的 σ_1 、 σ_x 分布图。可以看到,在该区域内,各应力的分布规律与真正的土拱顶部是一致的。 u_x 的变化规律也一样。而在应力拱底部区域内,由图 8 可看出, σ_1 为拉应力,而 σ_x 、 σ_3 仍为压应力;在接近应力拱部区域的过程中, σ_1 逐渐减小,并变为压应力;而 σ_x 、 σ_3 作为压应力其数值则逐渐增大。

由以上讨论可见,在本文所述的应力拱拱部区域,土体的受力及变形确实与真实的土拱一致:即挡土桩之间的土拱是真实存在的,以下简称其为挡土桩后的土拱。

2.3 挡土桩后土拱的形状

由以上分析可知,在土拱区域,所有的应力均为

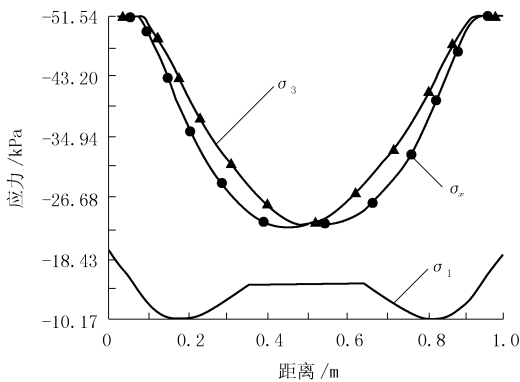


图 7 路径 1 上各应力的分布情况

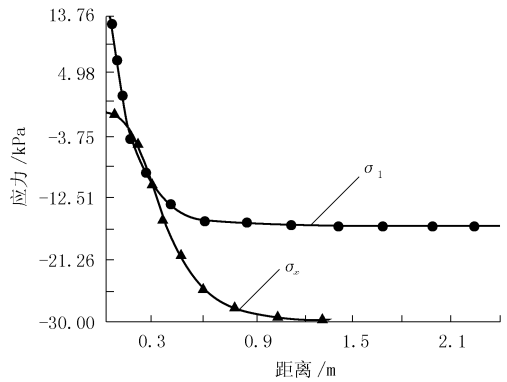


图 8 路径 2 上各主要应力分布情况

压应力。而由本文第 2.2 部分,对挡土桩后的土体,在最左侧区域, σ_1 为拉应力。因此,可以定义: $\sigma_1 = 0$ 为划分土拱底部区域与土拱区域的界限。

由图 6 及图 8 可以看到,在土体最右侧的区域,应力分布是均匀的,数值也为常数,即土拱效应并未影响到该区域。因此,土拱效应的影响区与该应力均匀区之间也应有一分界线,该分界线确定了土拱的顶部边界。

为了确定上述土拱区域的边界线,在计算模型上取若干个水平方向的路径,分别列出这些路径上各点的 σ_1 值,并做出其分布曲线; $\sigma_1 = 0$ 的点即为拱底位置, $\sigma_1 \sim \sigma_x$ 曲线上 σ_1 开始基本保持不变的点即为拱顶位置。分别将这些拱顶位置点和拱底位置点用曲线相连,即构成挡土桩后土拱的区域。图 9 给出了不同荷载下土拱区域范围。

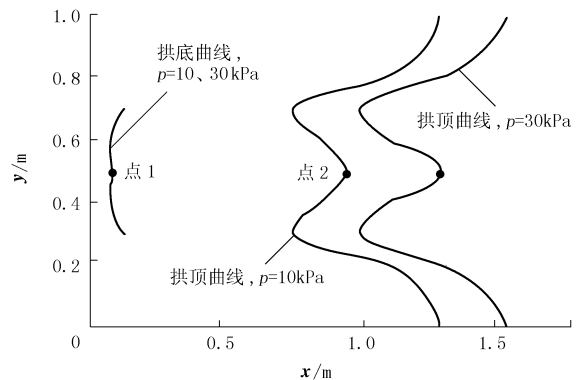


图 9 荷载对挡土桩后土体土拱形状的影响

可以看到,土拱的拱底几乎不随荷载变化,而拱顶则随荷载的增大而逐渐后移,即土拱区域随荷载的增大而逐渐增大。由于有限元分析的局限,靠近挡土桩时土体各单元皆为压应力,故拱底曲线在靠近挡桩时无法确定。

2.4 挡土桩净距与土拱区

为了讨论上的方便,以下取两挡土桩过中点的

水平线与拱底及拱顶的交点作为土拱的特征点(图9中点1及点2)进行讨论。

图10给出了土拱区特征点随挡土桩净距的变化关系。

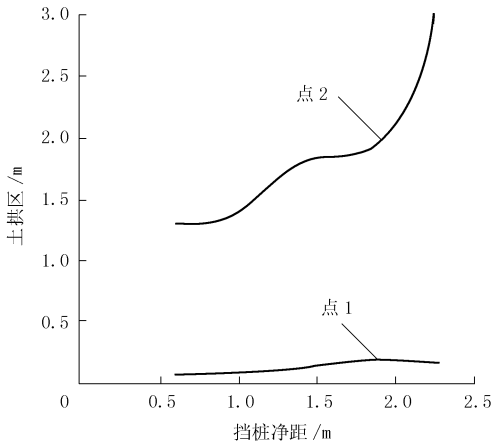


图10 土拱区范围与挡土桩净距的关系

由图10可以看到,与土拱区随荷载的变化规律类似,随挡土桩净距的增加,土拱区范围也迅速扩大,而且这种扩大主要表现在土拱顶部位置的变化。但应明确,与一般结构类似,土拱的承载力由土拱的区域及跨度综合确定,单纯的厚度增加不能保证提高其承载力。

3 结论

(1)深基坑挡土桩后的土体可以分为3个区

域:土拱底区域、土拱区及土拱顶部的均匀应力区。在土拱底区域内,土体所受的主应力是拉应力;在土拱区域,其受力及变形特征与真正的土拱一致。

(2)本文给出了这3个区域的边界线: $\sigma_1 = 0$ 的点即为拱底边界线, $\sigma_1 \sim \sigma_x$ 曲线上 σ_1 开始基本保持不变的点即为拱顶边界线位置。

(3)探讨了荷载及挡土桩净距对土拱区形状的影响,发现:土拱的底边几乎不随荷载而变化,而顶边线随荷载的增大而抬升,即土拱区域随荷载而增大。土拱形状随挡土桩净距的变化也有类似规律。

参考文献:

- [1] Karl T. Theoretical soil mechanics (4th edition) [M]. New York: John Wiley & Sons, 1947. 66 - 76.
- [2] 韩爱民,肖军华,梅国雄. 被动桩中土拱效应特征与影响参数研究[J]. 工程地质学报, 2006, 14(1): 111 - 116.
- [3] 张建勋,陈福全,简洪钰. 被动桩中土拱效应问题数值分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(2): 174 - 178.
- [4] 张建华,谢强,张照秀. 抗滑桩结构的土拱效应及其数值模拟[J]. 岩土力学与工程学报, 2004, 23(4): 699 - 703.
- [5] Pieter A. Vermeer, Ankan Punlor, Nico Ruse, Arching effects behind a soldier pile wall[J]. Computers and Geotechnics, 2001, 28: 379 - 396.
- [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, 26(3): 455 - 462.
- [8] 夏雄. 一种深基坑支护桩间距的确定方法[J]. 铁道建筑, 2005, (7): 71 - 73.

浙江省建筑业行业协会地下工程分会 2006 年会暨“浙江隧道与地下工程论坛”在杭州举行

本刊讯 浙江省建筑业行业协会地下工程分会 2006 年会暨“浙江隧道与地下工程论坛”于 2006 年 12 月 8 日在杭州教育大厦隆重举行。

本次年会也是地下工程分会成立 4 周年的庆典。中科院孙钧院士,中国工程设计大师、浙江省建设厅科技委副主任、抗震委副主任、省建筑设计研究院顾问总工益德清教授,省建筑业管理局总工程师、省建筑业行业协会副秘书长姚光恒教授级高工,国家电力监管委大坝中心副主任何海源教授,省建筑设计研究院董事长、院长李海波教授,浙江大学竺可桢学院副院长唐晓武教授,杭州市勘察设计协会副秘书长顾梅英高工,杭州市土木建筑学会岩土专业委员会主任委员张弭教授级高工,浙江省第一水电建设有限公司董事长、总经理蒋文龙高工以及丹麦科威国际咨询公司上海代表处首席代表张金屏博士等出席了大会。

地下工程分会史佩栋会长主持了上午的大会,他首先传达了 2006 年中国土木工程学会第 12 届年会暨隧道及地下工程分会第 14 届年会的主要精神和中国土木工程学会理事长、建设部原副部长谭庆琏同志的重要讲话,并向大会汇报了地下工程分会 2006 年的工作。

孙钧院士作了题为《国内正在兴建的若干重大地下工程技术关键》的报告。孙院士所述皆为其近年亲自主持(或参与)研究、论证或

审定的国内特别重大的工程项目,他寓精辟的理论分析于方案比选,融深刻的经验教训于设计施工。报告内涵丰富,使代表们开阔了视野。

下午的大会由唐晓武教授主持。上海隧道工程股份有限公司总工程师杨国祥教授级高工、上海市基础工程公司顾问总工桂业琨教授级高工、同济大学地下建筑与工程系谢雄耀副教授等分别作了题为《长距离超大直径盾构隧道施工关键技术》、《地下连续墙近期技术进展及事故案例》、《上海地铁风险评估研究》的报告。这些报告紧扣地下工程当前的热点难点课题和最新前沿,代表们获益良多。

大会增聘益德清大师为分会特邀顾问。大会增补浙江省建科院李海波院长和省第一水电建设有限公司蒋文龙董事长为地下工程分会副会长,并增补了李义章等 10 余位常务理事和理事;增聘杭州市地铁集团有限责任公司裘志坚高工为副秘书长。

出席大会听取论坛报告的有来自省内各地的地下工程分会会员以及各地相关企事业单位和院校社团等的专家代表共 150 余人;浙江大学相关专业即将出国深造的硕士、博士研究生等 20 余位,中国第十三冶金建设五公司、北京市三一重机有限公司等的专家和领导也专程赶来参加大会。

(浙江省地下工程分会 供稿)