

邻近斜坡沉桩挤土球孔扩张分析

饶平平^{1,2}, 李镜培^{1,2}, 刘颖³

(1. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092;
3. 南昌工程学院土木与建筑工程学院, 江西 南昌 330099)

摘要: 针对邻近斜坡条件下沉桩挤土球孔扩张问题, 假定土体为线弹性模型, 将桩体的贯入模拟为球形孔扩张过程, 采用镜像方法, 得到了邻近斜坡条件下球孔扩张挤土位移解答。分析了考虑边界的不同倾斜角度下的球孔扩张挤土位移场变化规律。结果表明, 随着倾斜角度的减小, 倾斜边界对球孔挤土位移的影响逐渐减小。此可以为类似工程挤土位移控制及参数设置提供参考。

关键词: 邻近斜坡; 镜像方法; 球孔扩张; 挤土位移

中图分类号: TU473 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2011)S2-0321-05

作者简介: 饶平平(1984-), 男, 江西东乡人, 博士研究生, 主要从事岩土及隧道工程施工环境效应研究。E-mail: raopingping@sohu.com。

Spherical cavity expansion-induced soil squeezing effect adjacent to slope

RAO Ping-ping^{1,2}, LI Jing-pei^{1,2}, LIU Ying³

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Department of Geotechnical Engineering Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. College of Civil Engineering and Architecture Nanchang Institute Technology, Nanchang 330099, China)

Abstract: Assuming that the soil is the linear elastic constitutive model for the cavity expansion and pile-sinking induced soil squeezing effect adjacent to slope, with the pile of penetration for simulating spherical cavity expansion process, the soil compaction displacement field are presented considering different boundary angles based on the mirror image method. The results indicate that the influence of inclination boundary on the soil compaction displacement becomes smaller with the decrease of inclination angle. The results will provide some reference value for engineering design.

Key words: adjacent to slope; mirror image method; spherical cavity expansion; soil compaction displacement

0 引言

近年来, 国内外学者及工程技术人员对沉桩挤土所带来周围环境的不利影响进行了大量的研究, 取得了显著的研究成果^[1-6]。然而, 目前针对该问题的研究主要是基于平面应变轴对称假定的基础上应用圆孔扩张法、应变路径法以及有限元等方法分析, 而实际工程中很多施工场地所处的环境存在非轴对称边界。例如, 施工场地靠近斜坡(边坡)或码头岸坡问题。当施工场地邻近码头岸坡时, 由于临江面岸坡阻力小, 桩位会向江面移动, 严重的会使得本来稳定的岸坡在施工时发生变形或失稳。如上海的张华浜码头, 沉桩时岸坡发生严重的变形^[7]; 安徽的荻港由于在沉桩前未考虑对岸坡稳定的影响, 造成已经打好的几百根桩随岸坡下滑, 直接经济损失达500多万元^[8]; 浙江舟山20万吨油码头系缆墩, 沉桩时产生了1米多的位移,

最后码头岸坡发生大滑坡使得一个系缆墩全部滑入海中, 损失惨重^[9]。

邻近斜坡处沉桩扩孔所造成的挤土效应, 对于这一问题目前尚缺乏充分的研究, 没有成熟的计算方法, 对其挤土效应机理也不是很清楚。文献[10]应用曲线坐标变换方法, 试图研究非轴对称位移边界下圆孔扩张问题, 但其只能求解固定边界条件下的应力场及位移场, 且过程较为繁琐, 不适宜工程应用; 文献[11]采用位移-位移问题的假定, 从球孔扩张的基本解答出发, 得到了水平及竖直边界条件下的位移场, 然而实际工程大多边界不仅是水平或竖直边界, 而是存在不同倾斜角度。基于以上原因, 本文将桩体的贯入模拟为球形孔扩张过程, 针对球孔扩张理论进行改进,

采用镜像方法, 分析了考虑边界的不同倾斜角度下的球孔扩张挤土位移场变化规律, 以期为实际工程设计和施工提供参考, 并为进一步的理论研究提供试验支持。

1 基本理论及力学模型

沉桩的挤土位移问题可以采用平面应变假定的柱孔扩张法和无限土体假定的球孔扩张法模拟, 按照弹性力学方法, 要找到所有满足位移和应力边界的精确解析解是很难实现的, Sagaseta^[12]提出的将沉桩问题视为位移-位移问题的假定得到了广泛的应用, 其认为在求解沉桩挤土位移场问题中, 如果沉桩挤土的边界条件是由位移所控制的, 可视为位移-位移问题, 即土体受到挤压后的变形是研究重点, 而对于应力边界条件, 可以简化处理。

针对本文研究的邻近斜坡沉桩挤土球孔扩孔问题, 做如下基本假定: ①土体为均质线弹性体, 满足胡克定律; ②土体变形为小变形; ③忽略土体的自重作用; ④土体饱和, 不可压缩, 且土体变形为位移-位移问题。

无限土体中, 根据球孔扩张过程中土体不可压缩的假定, 可知扩孔过程土体体积守恒, 因此任一位置处的土体体积满足:

$$\frac{4}{3}\pi a^3 + \frac{4}{3}\pi R^3 = \frac{4}{3}\pi(R + S_R)^3, \quad (1)$$

式中, a 扩张球孔半径, R 为无限土体中球坐标下任一半径, S_R 为此半径处的土体位移。

忽略 S_R 的高阶次项, 则任一半径处的土体位移可以表示为

$$S_R = \frac{a}{3} \left(\frac{a}{R} \right)^2. \quad (2)$$

将球坐标表达式转化为柱坐标系下可得

$$S_r = \frac{a^3}{3} \frac{r - r_0}{R^3}, \quad (3a)$$

$$S_z = \frac{a^3}{3} \frac{z - z_0}{R^3}, \quad (3b)$$

式中, S_r 与 S_z 分别为径向和竖向位移, r 与 z 分别为计算点径向和竖向坐标, r_0 与 z_0 分别为扩张球心的径向和竖向坐标, $R = \sqrt{r^2 + z^2}$ 。

由于水平向位移边界对水平及竖向位移影响较大, 而对 y 方向的位移影响较小, 因此本文主要对水平及竖直方向位移进行分析。如图1所示, 土体内半径为 a 的球孔进行扩张, 球孔坐标为 $(0, 0, h)$, 在 $x = t$ 处的位置存在水平自由位移边界。假定边界面光滑, 根据对称镜像原理, 在对应于自由位移边界处的位置设置镜像收缩球孔, R_1 为孔周任意一点 $p(x, 0, z)$ 到球孔

中心的距离, R_2 为孔周一点 $p(x, 0, z)$ 到镜像收缩球孔中心的距离, 空间柱坐标系下可以得到球孔扩张后孔周任意一点 $p(x, 0, z)$ 处的挤土位移场^[11]:

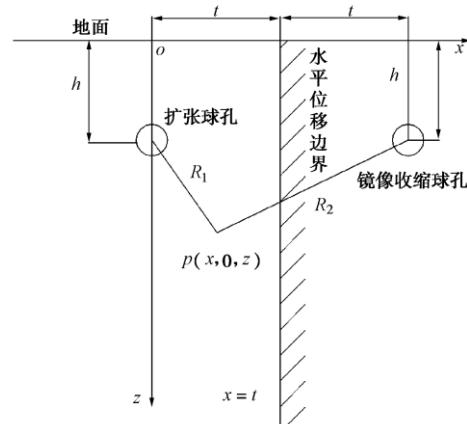


图 1 水平位移边界示意图

Fig.1 Sketch of horizontal displacement boundary

$$S_x = \frac{a^3}{3} \left(\frac{x}{R_1^3} - \frac{x-2t}{R_2^3} \right), \quad (4a)$$

$$S_z = \frac{a^3}{3} \left(\frac{z-h}{R_1^3} - \frac{z-h}{R_2^3} \right), \quad (4b)$$

式中, $R_1 = \sqrt{x^2 + y^2 + (z-h)^2}$, $R_2 = \sqrt{(x-2t)^2 + y^2 + (z-h)^2}$ 。

2 邻近斜坡球孔扩张位移求解

邻近斜坡处球孔扩张问题如图2所示, 在距离坐标原点 t 处的位置存在一定坡度的自由位移边界, 斜面自由边界倾斜角为 φ , 同样在相对应斜面边界镜像位置设置镜像收缩球孔, R_1 为孔周任意一点 $p(x, 0, z)$ 到球孔中心的距离, R_3 为孔周一点 $p(x, 0, z)$ 到镜像收缩球孔中心的距离。

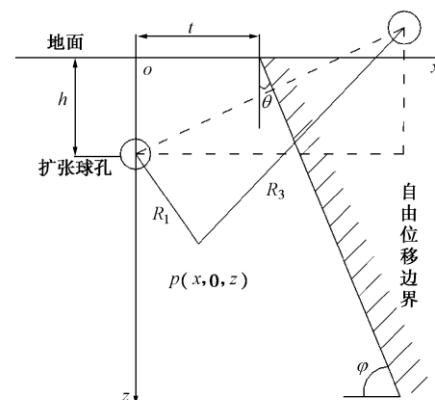


图 2 邻近斜坡处球孔扩张示意图

Fig. 2 Sketch of cavity expansion adjacent to slope

由图3可知 R_3 的表达式与 h , t 和 θ 3者的关系有

关, 根据图中几何关系可以得到:

(1) 当镜像收缩孔位于地表面以上时, 如图3(a)所示, 即 $h > t \cdot \tan 2\theta$ 情况下

因为 $o_5 o_6 = h \tan \theta$, $\Rightarrow o_1 o_6 = o_1 o_5 + o_5 o_6 = t + h \tan \theta$, $\Rightarrow o_1 o_4 = o_1 o_6 \cos \theta = (t + h \tan \theta) \cos \theta$, $\Rightarrow o_1 o_2 = 2 o_1 o_4 = 2(t + h \tan \theta) \cos \theta$, $\Rightarrow o_1 o_3 = o_1 o_2 \cos \theta = 2(t + h \tan \theta) \cos^2 \theta$, 所以 $p o_8 = o_1 o_3 - x = 2(t + h \tan \theta) \cos^2 \theta - x$, 又因为 $o_2 o_3 = o_1 o_2 \sin \theta = (t + h \tan \theta) \sin 2\theta$, 且 $o_3 o_8 = z - h$, 所以 $o_2 o_8 = o_2 o_3 + o_3 o_8 = (t + h \tan \theta) \sin 2\theta + z - h$ 。

由此可推导出 R_3 的表达式为

$$R_3 = \sqrt{(p o_8)^2 + (o_2 o_8)^2} \\ = \sqrt{(2(h \tan \theta + t) \cos^2 \theta - x)^2 + [z - h + (h \tan \theta + t) \sin 2\theta]^2}^{\circ}$$

(2) 当镜像收缩孔位于地表面以下时, 如图3(b)所示, 即 $h < t \cdot \tan 2\theta$ 情况下

同理可得 R_3 的表达式为

$$R_3 = \sqrt{[2(h \tan \theta + t) \cos^2 \theta - x]^2 + [z + h - (t + h \tan \theta) \sin 2\theta]^2}^{\circ}$$

(3) 当镜像收缩孔刚好位于地表面时, 如图3(c)所示, 即 $h = t \cdot \tan 2\theta$ 情况下

$$R_3 = \sqrt{[2(h \tan \theta + t) \cos^2 \theta - x]^2 + z^2},$$

式中, θ 为斜面边界与竖直方向的夹角, $\theta = 90^\circ - \varphi$ 。

同理可得邻近斜坡条件下球孔扩张后孔周任意一点 $p(x, 0, z)$ 处的挤土位移表达式为

$$S_x = \frac{a^3}{3} \left(\frac{x}{R_1^3} - \frac{x - 2(h \tan \theta + t) \cos^2 \theta}{R_3^3} \right), \quad (5a)$$

$$S_z = \frac{a^3}{3} \left(\frac{z - h}{R_1^3} - \frac{z - h + (h \tan \theta + t) \sin 2\theta}{R_3^3} \right). \quad (5b)$$

式(5)即为邻近斜坡条件下球孔扩张挤土位移解答, 为证明本文解答的正确性, 令倾斜角度 $\varphi = 90^\circ$, 即 $\theta = 0^\circ$, 则式(5)可退化到式(4), 即文献[11]解答; 当 $\theta = 90^\circ$ 时, 式(5)可以退化为

$$S_x = \frac{a^3}{3} \left(\frac{x}{[x^2 + (z - h)^2]^{3/2}} - \frac{x}{[x^2 + (z + h)^2]^{3/2}} \right), \quad (6a)$$

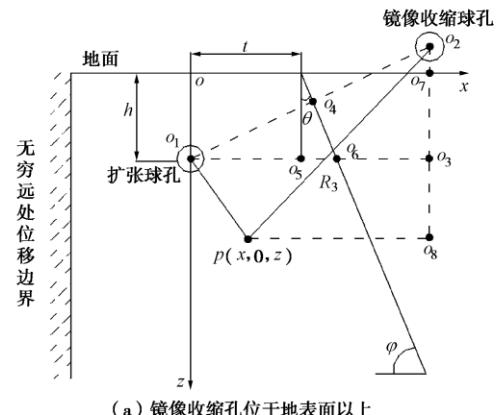
$$S_z = \frac{a^3}{3} \left(\frac{z - h}{[x^2 + (z - h)^2]^{3/2}} - \frac{z + h}{[x^2 + (z + h)^2]^{3/2}} \right), \quad (6b)$$

式(6)即为文献[12]的解答。

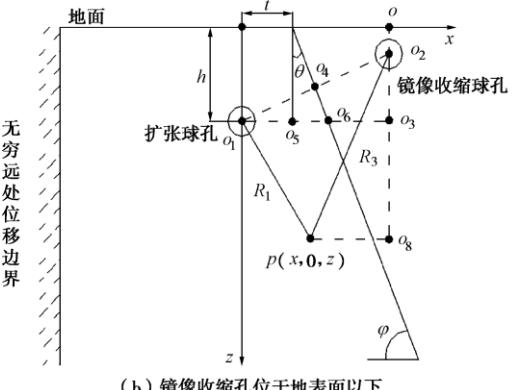
文献[11, 12]中解答为本文解答的一个特解, 本文解答除可以考虑球孔离边界不同距离、孔周不同距离的挤土位移外, 还可考虑边界的不同倾斜角度对应的位移变化规律。如将单个球孔扩张挤土位移扩展至一系列球孔扩张便可得到邻近斜坡条件下单桩沉桩的

挤土位移解答, 该解答对预估邻近斜坡、岸坡等条件下沉桩产生的挤土位移具有一定的参考和现实意义。

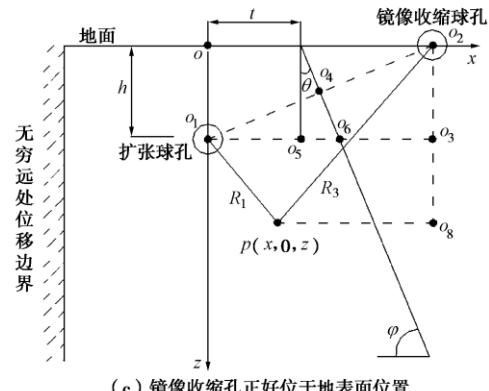
另外, 由上式可以看出, 地表面自由边界与倾斜边界处边界应力依然存在, 并没有完全修正, 因此本文方法得到的位移解答具有一定的近似性, Sagasetta^[12]与罗战友^[13]认为对于位移-位移问题, 应力边界对土体位移影响不大, 因此, 此方法得到的位移近似解答是有意义的, 且解答形式较为简答, 可以方便为邻近斜坡扩孔问题的挤土位移施工控制及参数设置提供参考。



(a) 镜像收缩孔位于地表面以上



(b) 镜像收缩孔位于地表面以下



(c) 镜像收缩孔正好位于地表面位置

图 3 镜像收缩孔位置与地表面关系

Fig. 3 Relationship between position of spherical cavity contraction and ground surface

3 算例分析

不同边界倾斜角度对孔周水平挤土位移的影响如下图 4 所示, 以靠近自由边界一侧距离球孔孔心 2 倍孔径 ($x=2a$) 处位移为分析对象。由图 4 可以看出, 在球孔深度范围内, 水平挤土位移随着深度的增大而逐渐增大, 且在球孔所处深度位置的位移最大, 此后随着深度的增大而逐渐减小; 当 θ 为 0° 时, 即竖直自由边界情况下, 水平挤土位移比具有一定角度倾斜边界所对应的位移大的多; 随着 θ 的不断增大, 倾斜边界对球孔挤土位移的影响逐渐减小。因此在实际邻近斜坡沉桩扩孔工程中, 如斜坡较陡需要削坡时, 在确保斜坡安全的前提下, 可将斜坡保持一定的倾斜角度。

从竖向挤土位移来看, 如图 5 所示, 在球孔以上到地表深度范围内, 竖向位移表现为向上隆起, 隆起值随着深度的增大而逐渐增大, 在球孔所处深度附近位置的向上隆起位移值最大, 当深度大于球孔深度时, 竖向位移表现为向下挤土, 此后位移随着深度增大而逐渐减小。与水平挤土位移相比, 竖向位移差异的衰减速度要小于水平位移差异的衰减速度; θ 越大, 最大向上隆起值也越大, 对于向下的挤土位移而言, θ 角的变化对其位移影响不大。

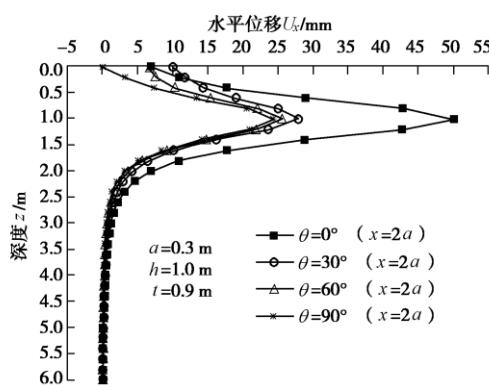


图 4 不同 θ 对水平位移的影响

Fig. 4 Influence of θ on horizontal displacement

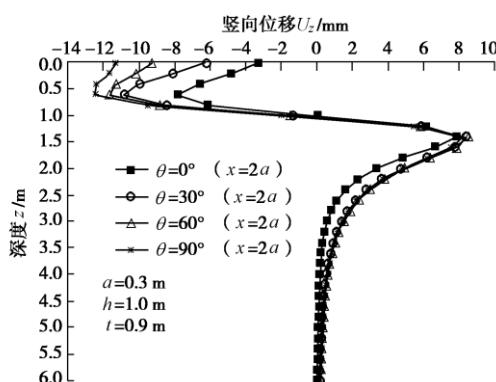


图 5 不同 θ 对竖向位移的影响

Fig. 5 Influence of θ on vertical displacement

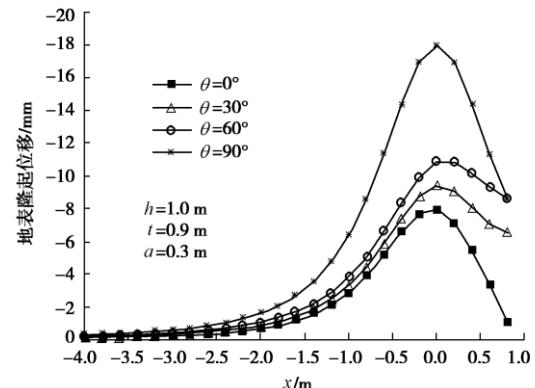


图 6 不同 θ 对地表隆起位移的影响

Fig. 6 Influence of θ on surface uplift displacement

不同边界倾斜角度对地表隆起位移的影响如图 6 所示, 由图 6 可以看出, 当 $\theta \neq 90^\circ$ 时, 由于边界条件的非轴对称性, 地表隆起位移也呈现出非轴对称特性, 地表隆起位移在球孔所处位置的正上方表现最大, 两侧逐渐减小, 最大隆起位移随着 θ 角的增大而逐渐增大; 当 $\theta = 90^\circ$ 时, 地表隆起位移关于坐标原点 ($x=0$) 完全对称。

4 结论及展望

(1) 推导了邻近斜坡条件下沉桩挤土球孔扩张位移解答, 并可以退化为已有文献解答; 本文解答不仅可以考虑球孔离边界不同距离、不同孔深的扩孔挤土位移外, 还可考虑边界的不同倾斜角度对应的位移变化规律; 另外, 本文解答形式较为简单, 可以为类似工程挤土位移控制及参数设置提供参考。

(2) 随着边界角度 θ 的不断增大, 即倾斜角度的不断减小, 倾斜边界对球孔挤土位移的影响逐渐减小。该结论较好的解释了在实际邻近斜坡沉桩扩孔工程中, 自由倾斜边界越陡(即参数 θ 越小), 斜坡挤土位移越大, 相应地斜坡稳定性也越差。

(3) 本文在处理边界问题时, 对应力边界进行了一定的简化, 因此得到的位移表达式只是近似解答, 对于沉桩扩孔产生的位移问题研究来说这样的简化是可行的, 但如果要进一步考虑沉桩扩孔时对周围建筑(构)筑应力变化等情况时, 必须要面对这样的应力边界条件, 如何进一步完善这个解答, 使其应力和位移都能满足所有边界条件, 将是下一步研究需要解决的问题。

参考文献:

- [1] VESIC A S. Expansion of cavities in infinite soil mass[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1972, **98**(3): 265 - 290.
- [2] BALIGH M M. Strain path method[J]. Journal Geotechnical Engineering, 1985, **111**(9): 1108 - 1136
- [3] CAO L F, THE C I, CHANG M F. Un-drained cavity expansion in modified cam clay[J]. Geotechnique, 2001, **51**(4): 323 - 334.
- [4] COLLINS I F, YU H S. Un-drained cavity expansion in critical-state soils[J]. International for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1996, **20**: 489 - 516.
- [5] SALGADO R, MITCHELL J K, JAMIOLKOWSKI M. Cavity expansion and penetration resistance in sand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1997, **123**(4): 344 - 354.
- [6] SAGASETA C, WHITTLE A J. Prediction of ground movements due to pile driving in clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, **127**(1): 55 - 66.
- [7] 袁和平. 打桩作用下码头岸坡稳定性研究[M]. 南京: 河海大学, 2006. (YUAN He-ping. Study on the stability of wharf slope under pile driving conditions[M]. Nanjing: Hohai University, 2006. (in Chinese))
- [8] 潘振社. 高桩码头打桩稳定验算的探讨[J]. 港工技术, 1986(2): 30 - 34. (PAN Zhen-she. Discussion of stability with piled wharf during pile driving[J]. Port Engineering Technology, 1986(2): 30 - 34. (in Chinese))
- [9] 杨克己. 实用桩基工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004. (YANG Ke-ji. Practical pile foundation engineering[M]. Beijing: China communications press, 2004. (in Chinese))
- [10] 高子坤, 施建勇. 基于非轴对称位移边界的沉桩挤土圆孔扩张解研究[J]. 土木工程学报, 2007, **40**(增刊): 344 - 349. (GAO Zi-kun, SHI Jian-yong. Research of non-symmetric CEM and pile-sinking induced soil squeezing effect[J]. China Civil Engineering Journal, 2007, **40**(S0): 344 - 349. (in Chinese))
- [11] 朱 宁. 静力压桩引起桩周土体变形的理论分析[D]. 南京: 河海大学, 2005. (ZHU Ning. Theoretical analysis of soil deformation due to piles jacking[D]. Nanjing: Hohai University, 2005. (in Chinese))
- [12] SAGASETA C. Analysis of undrained soil deformation due to ground loss[J]. Géotechnique, 1987, **37**(3): 301 - 320.
- [13] 罗战友. 静压桩挤土效应及施工措施研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004. (LUO Zhan-you. Study on compacting effects and construction measures of jacked pile[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004. (in Chinese))

(本文责编 胡海霞)