

桩基存在对基坑坑底变形性状的作用分析

叶真华, 唐世栋, 苏玉杰

(同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 基坑开挖时的卸荷, 使土体应力场发生变化, 引起坑底土体向上隆起。根据土体变形与模量的关系, 探讨桩基的存在对土体模量以及基坑坑底隆起的影响。通过有限元 ANSYS 计算模拟了基坑开挖的过程, 得出了有桩基和无桩基时基坑坑底隆起的趋势, 讨论了桩距、桩长、桩荷的影响。计算结果与室内模拟试验得出的结果相同, 与现场实测结果基本相符。

关键词: 基坑; 变形性状; 坑底隆起; 模拟试验; 工程桩; 立柱桩

中图分类号: TU473 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2009)10-0045-04

Analysis on Deformation Behavior of Basal Heave Considering Pile Foundation/ YE Zhen-hua, TANG Shi-dong, SU Yu-jie (Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering, Ministry of Education Tongji University, Shanghai, 200092)

Abstract: The stress field of soils will change and bottom of foundation pit will upheave with excavation unloading. According to the relation between deformation and modulus of soil mass, the influence of pile foundation on modulus of soil mass and basal heave is studied. The process of excavation is simulated by the FEM software ANSYS, the trends of basal heave with or without pile foundation are calculated, and the influence of pile space, pile length and the loading on pile are discussed. The results of calculation are the same to the results of simulation test and basically the same to the field measurement.

Key words: foundation pit; deformation behavior; basal heave; simulation test; engineering pile; upright pile

0 引言

在基坑开挖时, 由于土体的卸荷在基坑坑底会出现向上隆起现象。如果基坑坑底隆起量过大, 轻则影响施工质量, 重则引起基坑失稳, 坍塌。工程实践发现, 有桩基的基坑坑底隆起量比没有桩基的要小, 采用逆作法施工的基坑隆起量比顺作法约小 $1/3$ ^[1]。原因在于工程桩, 特别是立柱桩的存在增加了坑底介质整体的压缩模量, 从而对减小坑底位移起了很大的作用。目前计算坑底隆起的公式中都没有考虑工程桩和立柱桩的影响, 计算结果偏差较大。鲁宏曾用有限元对只存在工程桩的情况作了初步分析^[2], 但没有涉及立柱桩的作用。本文采用试验和有限元计算相结合的方法对此进行深入探讨, 分析了桩距、桩长、桩荷的影响, 并与无桩基的情况做了对比, 且分别通过工程实例加以验证。

1 桩基对基坑坑底土体性状的影响

1.1 土体模量与基坑坑底隆起的关系

土体模量与其变形有着密切的关系, 在受荷压

缩时如此, 卸荷回弹时也是如此。根据这一原理, 宰金珉提出一种简单的预测基坑隆起的计算方法^[3]:

$$\delta = 0.732Q(1 - \mu^2)/E_0 \quad (1)$$

式中: δ ——开挖回弹量; Q ——开挖的土体重量; μ ——土的泊松比; E_0 ——土的变形模量, kPa。

假设地基土为线弹性体, 变形模量(E_0)和压缩模量(E_s)之间存在如下的关系:

$$E_0 = xE_s \quad (2)$$

式中: $x = 1 - 2\mu^2/(1 - \mu)$, 且 $0 < x < 1$ 。

将式(2)代入式(1)中可以得到:

$$\delta = 0.732Q(1 - \mu^2)/(xE_s) \quad (3)$$

从式(1)和式(3)中可以看出基坑开挖回弹量与土的变形模量、压缩模量均成反比, 为了减小基坑开挖回弹量, 可以从增加压缩模量的角度来考虑。

1.2 桩基对土体压缩模量的影响

基坑监测结果表明, 桩基的存在对减小基坑回弹起到了很好的作用, 即加桩会增大土的压缩模量, 从而减小坑底变形。文献[4]的试验结果也验证了加桩对基坑开挖隆起的影响。该试验主要测试条形

收稿日期: 2009-04-29

基金项目: 上海市重点学科建设项目资助(B308)

作者简介: 叶真华(1966-), 男(汉族), 湖北人, 同济大学讲师, 岩土工程专业, 博士, 从事岩土工程监测、勘察的教学科研工作, 上海市四平路1239号, yezhen@mail.tongji.edu.cn。

基础加筋标准砂地基在竖向荷载作用下采取不同的布筋方式时土中的应力、位移和土表破坏形态,及加筋土在各级荷载作用下的应力,并与无加筋纯砂情况的应力进行比较。试验中条基宽度 $B = 8 \text{ mm}$,用不同长度的钢筋($\varnothing 4 \text{ mm}$)模拟基桩,在每种长度筋的情况下分别安置 $0.25B$ 、 $0.5B$ 、 $0.75B$ 、 B 、 $1.5B$ 和 $2B$ 共 6 种间距。由载荷试验得出的长度 $L = 1.5B$ 时 $p-s$ 曲线如图 1 所示(图中 x 为桩间距), $L = 0.5B$ 、 B 、 $2B$ 时的变形情况与其相似。

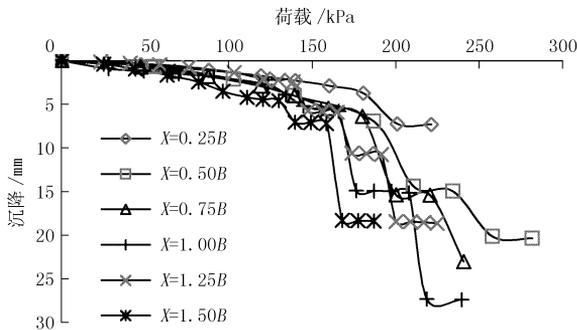


图 1 $L = 1.5B$ 时的荷载与沉降关系图

原状砂土的压缩模量为 $2.96 \times 10^3 \text{ kPa}$,根据图 1 中 $p-s$ 曲线的斜率可计算出不同情况下的压缩模量,并可计算加桩后土体压缩模量与原状砂土压缩模量比值(如图 2 所示)。

从实验结果可以看出,在砂土中安置桩基后地基土的压缩模量明显增大。从图 1 可以看出,在同一桩长的条件下,地基土的压缩模量($p-s$ 曲线中直线段斜率与地基土的压缩模量成反比)随桩间距的增大而减小,即桩间距越密压缩模量越大。从图 2 中可以看出,加桩后地基土的压缩模量比未加桩的砂土的压缩模量大 $8\% \sim 53\%$ 。

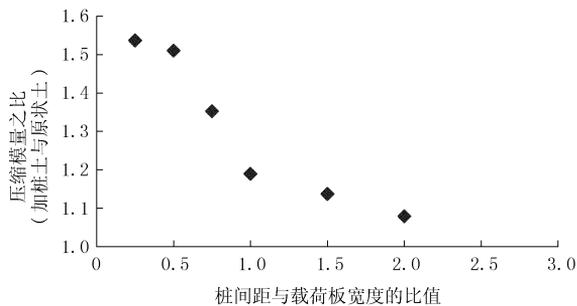


图 2 $L = 1.5B$ 时压缩模量的比值

由上文可知基坑开挖回弹量与土的压缩模量成反比,故加桩会减小基坑坑底变形,基坑隆起减小 $25\% \sim 36\%$ 。且随着桩间距的减小和工程桩长度的增长,桩基对坑底隆起的影响越大。

2 工程桩存在对基坑坑底变形影响的有限元分析

本文利用 ANSYS8.0 对基坑进行有限元分析^[5,6],模拟存在工程桩时基坑坑底变形情况。采用二维平面对基坑、墙体进行离散化,支护结构和支撑体系采用一维线单元弹性体,土体采用 Drucker-Prager 弹塑性模型,根据情况采用 6 节点或 15 节点三角形单元。考虑工程桩、立柱桩等因素的影响,本文水平方向计算域取 4~6 倍的开挖深度,竖直方向取 3~5 倍的开挖深度,计算边界条件在侧向和底面取不动支座。在计算中,假定基坑开挖前采用坑内降水,地下水位降至最终开挖坑底处,坑外地下水位在水平方向成线性分布。

2.1 基坑变形的基本假定

(1) 平面应变假定。基坑开挖实际是三维问题,但三维分析较复杂且计算量非常大。由于二维与三维的分析结果在反映基坑内外土体移动状况方面不仅形式相似而且数值接近,误差 $< 10\%$,可以认为二维的假定是合理的,能满足工程计算的要求。墙体刚度越大,支撑间距越小,土体越软,深基坑的平面应变的假定越接近实际。本文拟采用平面有限元法,对存在桩基的基坑变形进行分析。

(2) 开挖前桩基和围护结构的施工扰动影响不予考虑。

(3) 土体为均匀连续各向同性的,开挖过程中土体隆起为瞬时弹性的,且土体隆起体积与土体整体相比较小。

2.2 基坑开挖的模拟

基坑开挖过程的模拟即模拟基坑土体分阶段卸荷并引起土体和支撑系统中应力和位移改变的过程。首先确定天然状态下各个单元的初始应力场 $\{\sigma\}_0$ 和初始位移场 $\{\delta\}_0$,将分阶段开挖的土体分成若干土层单元,计算挖去土层单元的开挖荷载,再分析计算开挖荷载作用下各单元的应力变化 $\{\Delta\sigma\}$ 和位移变化 $\{\Delta\delta\}$,则第一步开挖完成时原系统内的二次应力场 $\{\sigma\}_1$ 和二次位移场 $\{\delta\}_1$ 为:

$$\begin{cases} \{\sigma\}_1 = \{\sigma\}_0 + \{\Delta\sigma\}_1 \\ \{\delta\}_1 = \{\delta\}_0 + \{\Delta\delta\}_1 \end{cases} \quad (4)$$

第一道支撑安装完毕后,进行第二步开挖。第二步开挖完成时,原系统内的三次应力场 $\{\sigma\}_2$ 和三次位移场 $\{\delta\}_2$ 为:

$$\begin{cases} \{\sigma\}_2 = \{\sigma\}_0 + \{\Delta\sigma\}_1 + \{\Delta\sigma\}_2 \\ \{\delta\}_2 = \{\delta\}_0 + \{\Delta\delta\}_1 + \{\Delta\delta\}_2 \end{cases} \quad (5)$$

当第 i 步开挖完成时,系统内的第 $i+1$ 次应力场 $\{\sigma\}_i$ 和位移场 $\{\delta\}_i$ 为:

$$\left. \begin{aligned} \{\sigma\}_i &= \{\sigma\}_0 + \sum_{k=1}^i \{\Delta\sigma\}_k \\ \{\delta\}_i &= \{\delta\}_0 + \sum_{k=1}^i \{\Delta\delta\}_k \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

3 实例计算分析

计算了上海地区 2 个基坑工程实例,例 1 的基坑中工程桩已施工完毕,例 2 的基坑中除工程桩外还有部分立柱桩。

3.1 仅存在工程桩时基坑坑底变形的计算分析

基坑的开挖长度为 100 m,宽度为 40 m,深度为 10 m。地下连续墙墙体深度为 20 m,墙厚为 0.8 m,弹性模量 $E = 2.5 \times 10^7$ kPa(考虑地下连续墙混凝土开裂,刚度将减少,取折减后的弹性模量),泊松比 $\mu = 0.18$,重度 $\gamma = 25$ kN/m³。采用 2 道内支撑,第一道支撑截面 500 mm × 500 mm,第二道支撑截面 600 mm × 600 mm,支撑水平间距 $L_s = 4$ m, $E = 2 \times 10^7$ kPa, $\mu = 0.18$ 。坑内地下水位在开挖前已经降到坑底处,不考虑地面超载。

工程桩为钻孔灌注桩,桩径为 800 mm,桩长 $l_p = 40$ m,桩间距为 4 m, $E = 2.5 \times 10^7$ kPa, $\mu = 0.18$, $\gamma = 25$ kN/m³。

土层综合参数: $E = 3.2 \times 10^3$ kPa, $\mu = 0.42$, $\gamma = 17.5$ kN/m³,粘聚力 $c = 15$ kPa,内摩擦角 $\varphi = 15^\circ$,膨胀角 $\beta = 10^\circ$,基坑分 3 次开挖。第一次开挖至 -4 m 深,做第一道支撑;第二次开挖至 -8 m 深,做第二道支撑;第三次挖至坑底^[7]。

按上述有限元分析建立模型如图 3。

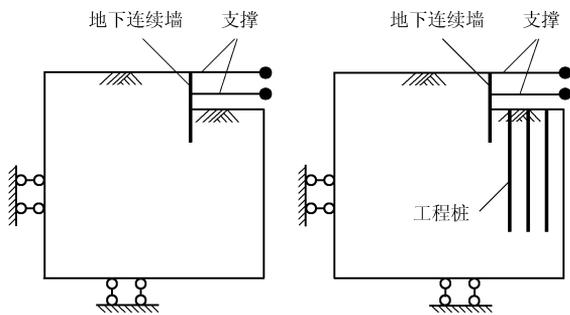


图 3 无工程桩和有工程桩时的基坑计算模型

用同样参数分别计算有工程桩及无工程桩存在时的基坑坑底隆起变形,结果如图 4 所示。

3.2 立柱桩和工程桩都存在时对基坑变形的计算分析

基坑开挖长度为 200 m,宽度为 40 m,开挖深度为 10 m,采用钻孔灌注桩支护结构,排桩深度 23 m,灌注桩 $\varnothing 800$ mm, $E = 3 \times 10^7$ kPa(考虑钻孔灌注桩

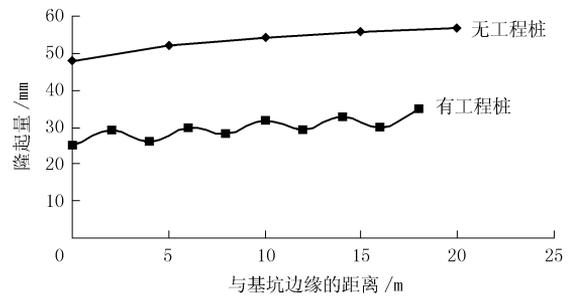


图 4 有无工程桩基坑坑底隆起的变形图

混凝土开裂,刚度将减少,取折减后的弹性模量), $\mu = 0.18$, $\gamma = 25$ kN/m³,组合钢支撑,其截面面积 500 mm × 500 mm。支撑水平间距 $L_s = 2$ m,取 $E = 3 \times 10^9$ kPa, $\mu = 0.5$,在过程中考虑其整体结构自重,重度为 100 kN/m³。坑内地下水在开挖前已经降到坑底处,不考虑地面超载。

工程桩和立柱桩均为钻孔灌注桩,立柱桩 $\varnothing 800$ mm,桩长 $L = 50$ m,桩间距为 8 m, $E = 3 \times 10^7$ kPa, $\mu = 0.18$, $\gamma = 25$ kN/m³;工程桩 $\varnothing 600$ mm,桩长 $L = 43$ m,桩间距为 2 m, $E = 3 \times 10^7$ kPa, $\mu = 0.18$, $\gamma = 25$ kN/m³。

土层综合参数: $E = 3.0 \times 10^3$ kPa, $\mu = 0.42$, $\gamma = 17.5$ kN/m³,粘聚力 $c = 17$ kPa,内摩擦角 $\varphi = 13^\circ$,膨胀角 $\beta = 10^\circ$ 。基坑分 3 次开挖。第一次开挖至 -3 m 深,做第一道支撑;第二次开挖至 -8 m 深,做第二道支撑;第三次挖至坑底^[7]。

建立计算模型如图 5,用同样参数分别计算无基桩时及工程桩和立柱桩都存在时的基坑坑底隆起变形。结果如图 6 所示。

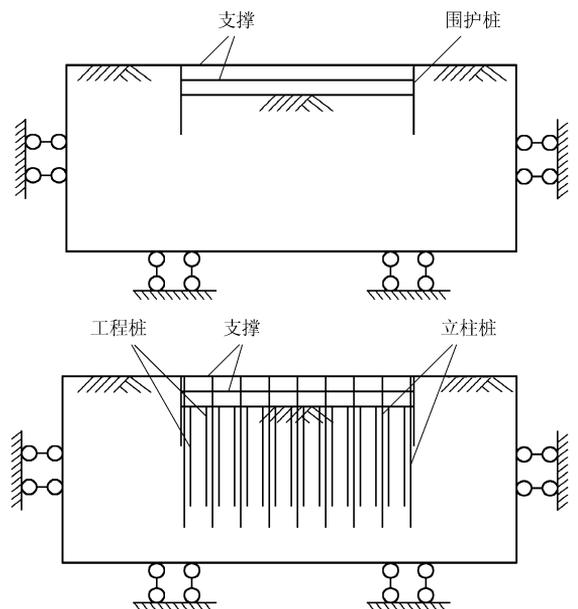


图 5 无桩基和有桩基时基坑计算模型

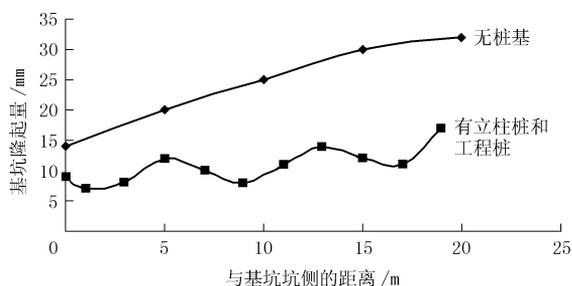


图6 有无桩基基坑坑底隆起的变形图

3.3 计算结果分析

由图4可知,基坑内有工程桩存在时,坑底隆起曲线为波纹线,波谷处是工程桩所在的位置,最大的隆起量约为35 mm;无工程桩存在时,隆起曲线为平滑上凸形,基坑坑底最大隆起量为57 mm。通过多个算例的综合分析比较,有工程桩时的基坑坑底隆起量比无工程桩时减少25%~50%。

由图6可知:基坑内立柱桩与工程桩都存在时,基坑隆起曲线为波纹线,坑底最大的隆起量约为17 mm。波谷处是立柱桩和工程桩所在的位置,其中工程桩的波谷高于立柱桩的,这是因为立柱桩的桩长、桩径和荷载都大于工程桩。无桩基时,隆起曲线为平滑上凸形,基坑坑底最大隆起量为32 mm。通过多个算例的综合分析比较,有工程桩和立柱桩的基坑坑底隆起量比无工程桩的减少40%~50%。

以上计算结果,与现场实测结果基本一致。

4 结论

(1) 基坑坑底隆起量与土体的压缩模量呈反比

关系。试验和经验都表明,在基坑内设置基桩后会增加土的压缩模量,从而减小基坑坑底变形,且随着桩间距的减小和工程桩长度的增加,基桩对坑底隆起的影响越大。

(2) 运用 ANSYS 建立有限元模型定性分析工程桩和立柱桩对基坑坑底隆起的影响,结果表明:①基坑内无工程桩时,隆起曲线为平滑上凸形;有工程桩时,基坑隆起曲线为波纹线,波谷处是工程桩所处位置,说明基坑中有工程桩时,能显著减小基坑坑底隆起;②基坑内若还有立柱桩存在时,基坑隆起曲线为波纹线,立柱桩和工程桩所处位置都在波谷处,但立柱桩的谷底比工程桩的更低,说明基坑中有立柱桩时,减小基坑坑底隆起的作用更为明显。

参考文献:

- [1] 戴标兵,范庆国,赵锡宏.深基坑工程逆作法的实测研究[J].工业建筑,2005,35(9):54-59.
- [2] 鲁宏.考虑工程桩的存在对深基坑变形性状影响的有限元分析[D].天津:天津大学,2004.
- [3] 宰金珉.开挖回弹预测的简化方法[J].南京建筑工程学院学报,1997,(2):23-27.
- [4] 李洋溢.条形基础加筋砂土地基室内模型试验的分析研究[D].上海:同济大学,2006.
- [5] [美]S. S Rao,著.工程中的有限元法[M].傅子智,译.北京:科学出版社,1991.
- [6] 吴家龙.弹性力学[M].上海:同济大学出版社,1993.
- [7] 苏玉杰.逆作法基坑立柱桩的位移计算分析[D].上海:同济大学,2006.

(上接第44页)

参考文献:

- [1] Ball D A. Design Method for GSHP[J]. ASHRAE Trans, DC-83-03:416-440.
- [2] 王秉忱,田廷山,赵继昌,等.我国地温资源开发与地源热泵技术应用、发展及存在问题[J].地热能,2009,(1).
- [3] 李家伟.对土壤热泵装置的研究[D].青岛:青岛建工学院,1995.
- [4] 于立强.青岛东部开发区建设以海水作冷热源大型热泵站可行性分析[A].全国暖通空调制冷学术年会论文集[C].1996.
- [5] 李家伟,廉乐明,于立强.土壤源热泵的国内外发展历史与现状[A].全国暖通空调制冷学术年会资料集[C].1996.
- [6] 于立强,张开黎,李梵.垂直埋管地源热泵机实验研究[A].全国暖通空调制冷学术年会学术论文集[C].北京:中国建筑工

业出版社,2000.

- [7] 李梵.垂直埋管土壤源热泵的研究[D].青岛:青岛建工学院,1999.
- [8] 刘宪英,王勇,胡鸣明,等.地源热泵地下垂直埋管换热器的试验研究[J].重庆建筑大学学报,1999,(5).
- [9] 林媛.太阳能深层土壤蓄热的数值模拟与实验研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2003.
- [10] 杨卫波,施明恒,董华.太阳能-土壤源热泵系统(SESHPs)交替运行性能的数值模拟[J].热科学与技术,2005,4(3):228-232.
- [11] 吴晓寒.地源热泵与太阳能集热器联合供暖系统研究及仿真分析[D].长春:吉林大学,2008.
- [12] 马宏权,龙惟定.埋管地源热泵系统的热平衡[J].暖通空调,2009,39(1).