超星·期刊

第25卷第3期 华东交通大学学报 Vol. 25 No. 3
2008年6月 Journal of East China Jiaotong University Jun., 2008

文章编号: 1005-0523(2008)03-0006-05

基于模型试验的板桩墙支护变形机理分析

林 鹏[1],郑明新[1],熊孝波[2],王艳红[3],杨 萍[1]

(1. 华东交通大学 土木建筑学院,江西 南昌 330013; 2. 井冈山大学 工学院,江西 吉安 343009; 3. 南昌理工学院,江西 九江 330401)

摘要: 在准二维平面应变条件下,运用所研制的深基坑开挖室内试验模型,通过模拟板桩墙支护深基坑在无支撑悬臂式支护、单支撑和双支撑支护等3种支护形式下的开挖,测量出深基坑支护结构的位移、土体表面的沉降及土体位移场的变化,探讨了板桩墙的插入比λ、有无横向支撑及支撑的位置对基坑开挖变形的影响规律,为基坑变形机理的研究及预测提供依据.

关 键 词: 深基坑; 开挖与支护; 模型实验; 板桩墙; 变形分析

中图分类号: TU411.93 **文献标识码**: A

在深基坑众多的支护形式中,常用的悬臂式板桩墙支护结构简单、施工方便,目前已有大量的学者对其变形机理作了研究; 而支撑式板桩墙支护结构可以较好的克服悬臂式支护下深基坑变形过大的不足[1],但其变形机理复杂,当前仍是困扰基坑变形理论发展的一大瓶颈. 由于现场测试耗资大,采用了较为经济的室内模型试验法[2],在准二维平面应变条件下,利用金属框架式模型箱及砂土自重开展模型试验,通过试验来探讨悬臂式板桩墙支护模型及支撑式板桩墙支护模型在基坑室内模拟开挖过程中的土体表面位移、支护结构位移及土体应变场的变化情况,借此来分析深基坑开挖变形的机理,为探讨影响基坑变形的预测因子做一些有益的尝试.

1 试验模型的研制

1.1 模型箱的设计与制作[3]

目前在已有的室内模型试验中试验箱大小不一,根据已发表的文献研究成果并结合实验室实际情况,确定模型箱的尺寸为: (长×宽×高) = 1 300 mm×500 mm×1 000 mm. 模型箱由角钢焊接成框架,前侧采用10 mm厚透明钢化玻璃,以便观测; 后侧采用10 mm厚木板. 左侧为10 mm厚木板,右侧为4块200 mm宽、500 mm长的PVC扣板拼接而成(便于开挖时依次拆卸); 并在后侧表面覆盖一张光滑的镀锌铁皮,前后两侧涂抹润滑剂——甘油,详见图1.

图1 模型箱

1.2 板桩墙的设计与制作[4]

模型将板桩墙作为刚性墙体,考虑刚性墙的刚度较大,故只考虑墙身的平移或转动,转动的中心可能是墙的底部,也可能是绕某一支撑点转动. 此次试验板桩墙采用2块PV聚氯乙烯塑料板用玻璃胶粘接而成,板的尺寸为: 长×宽×厚 = 650 mm×500

收稿日期: 2008-03-10

基金项目: 江西省教育厅2006年科技计划资助项目(赣教技字182号)

作者简介: 林鹏(1980-),男,湖北随州人,华东交通大学在读硕士研究生,研究方向为深大基坑开挖与支护工程.

超星·期刊

mm × 20 mm.

1.3　模型支撑的制作

选用抗弯刚度符合要求的 ϕ10 钢筋作为支撑,杆件分为两节,中间用“花篮”连接,便于试验安装.

1.4　模型土的选取

参照国内外已有的模型试验,本试验选用南昌赣江普通的建筑用砂(现场测试其含泥量较高),砂经过风化后提取过 2 mm 标准筛的细砂作为模型土(可以便捷的重复使用). 试验需要测出相关土的参数如表 1.

表 1　模型土的物理力学参数

类别	内摩擦角 φ	土粒比重 ds	含水率 %	空隙比 e	重度 γ /kN·m^{-3}
数值	31.6	2.620	0.067	0.965	13.756
类别	颗粒组成				
	2.0 – 1.0	1.0 – 0.5	0.5 – 0.25	0.25 – 0.1	< 0.1
数值	2.756	8.207	33.101	53.744	1.605

2　基坑开挖模型试验的实施

2.1　基坑开挖的前期准备

为了解决板桩墙边缘漏砂问题,在其边缘制作时,各留有 3 cm 长的边料,把边料折成与板桩成 90 度角,填砂时利用砂的自重压住边角,试验证明该方法可以有效的防止砂进入边缝. 同样,为了观测方便和测量的快捷,在前侧的钢化玻璃上每隔 5 cm 设置 1 条水平和垂直的刻度线组成网格.

2.2　测点布置及量测方法

考虑试验主要是探讨板桩墙支护侧地表土体位移、土体内位移场与支护板桩墙位移变化特征,具体的布置标志点如图 2 所示.

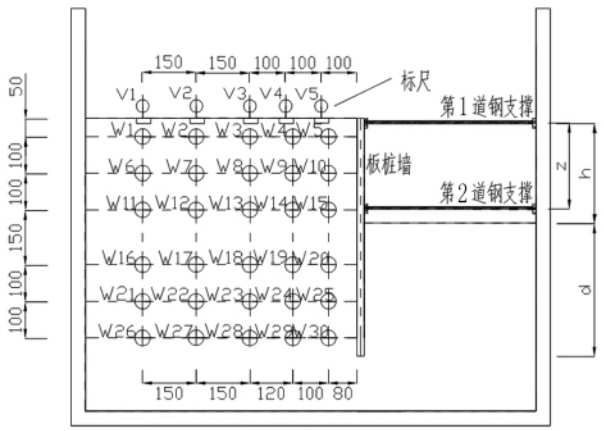

图 2　试验各测点的布置及编号(单位: mm)

代表土体表面位移的各测点均布置在模型箱的中轴线上,这些标志点本身带有刻度,在基坑地面布置 1 条水平钢尺来读取水平位移及标志点的垂直位移. 土体内位移场的测点是将分割的小塑料泡沫块分层埋设,在泡沫的中心插上大头钉,以钉帽作为观测点; 其量测方式为通过刻度尺读取. 板桩墙的位移是用在其轴心线所插的大头钉来测量.

2.3　开挖及支护方式

为探索深基坑开挖过程中支护板桩墙及土体的变形机理,板桩墙埋深为 650 mm,距离箱底 150 mm,填砂高为 800 mm. 装砂时板两侧对称填砂,每次填入 150 mm 厚时,砂表面用刷子刷平后用木板压实. 基坑开挖选取六步开挖,分别是 150 mm、100 mm、100 mm、50 mm、50 mm、50 mm,而在设有支撑的试验中采取了更多的开挖步(递增步为 50 mm),以便于观察基坑失稳破坏的形态.

带有支撑的板桩墙试验分两类:

(1) 单层支撑方式,支撑分别设置于距离基坑地面 0 mm、200 mm、300 mm、400 mm 处,共 4 组;

(2) 双层支撑方式,第一道支撑置于距离基坑地面 0 mm 处,另一道支撑分别设置于距离基坑地面 200 mm 与 400 mm 处,共 2 组.

3　试验结果分析

试验结果分析中采用如下参数: 基坑开挖的最大深度为 h_{max},此时板桩墙的入土深度为 d_{min}; 各级开挖步为 h_i,各级开挖步所对应的板桩墙入土深度为 d_i,基坑支护侧地表沉降为 s,板桩墙的位移为 δ,单支撑及第二道支撑距离基坑地面的垂直距离为 z,板桩墙的插入比为 $\lambda(\lambda = d/h)$,板桩长为 $H(H = h + d)$.

3.1　无支撑悬臂板桩墙支护深基坑开挖试验分析

1) 基坑表面土体沉降分析

基坑在不同开挖深度时地表土体沉降曲线见图 3. 可以看出: 距离板桩墙越近处地表土体沉降越大,其中距离板桩墙最近的 1 个标志点 V5,至第 6 步开挖完成时最大沉降达到 176 mm,沉降量占基坑开挖总深度的 35.2%,此时支护结构已经失稳倾覆; 从图中还可看出离板 450 mm 处沉降量已经很小了,离板 600 mm 以外范围的土体几乎没有沉降发生.

在完成第 1、2、3、4、5 步开挖时,各自所产生的最大沉降分别为第 6 步开挖所产生沉降的 1.14%、2.84%、5.11%、11.93%、54.55%. 由此可见第 5 步开挖对地面沉降影响也较为显著,虽然最后 2 步的开挖深度分别仅为总开挖深度的 10%,但变形却分

超星·期刊

别占总沉降42.61%、45.55%，因此第5步与第6步开挖已经变得非常敏感，只要稍有扰动就能够引起支护侧砂的较大的变形.

2) 支护板桩墙的位移分析

从图4中可以得出：随着开挖深度的增大，板顶水平位移也随之逐渐增大，在完成第4步开挖时，板顶开始出现比较明显的水平位移，而在开挖第6步时板顶水平位移显著增长，占到总位移的61.39%，从而引起了支护侧土体出现明显的沉降位移. 至第6步开挖完成时，δ_{max}达到158 mm，δ_{max}与模型板长之比$\delta_{max}/H=24.31\%$，此时板后地面已出现明显沉陷，但在此时若停止开挖，板仍能达到稳定状态. 通过图3、图4推出：支护板桩墙的水平位移情况与板后侧地面沉降规律极为相似，更说明支护结构水平位移对支护侧土体的沉降影响很大.

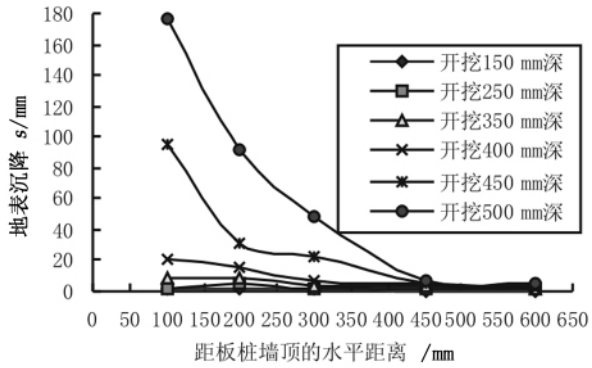

图3 不同开挖深度时地表面沉降曲线

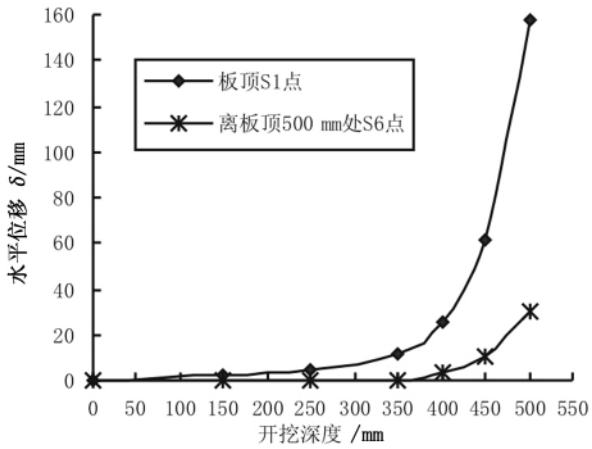

图4 不同开挖深度时板桩墙的位移曲线

3) 板桩墙的插入比对基坑变形的影响

板桩墙的插入比λ对基坑变形的影响是随着λ的增加，地表相对最大沉降s_{max}/h、支护板桩墙相对最大侧移δ_{max}/h逐渐减小，如图5所示；当$\lambda<0.8$，基坑的变形急剧增大；而当$\lambda>1.6$后其作用已经很小了. 因此，在板桩墙支护基坑开挖中λ过大，并不能有效的减小基坑的变形，不但不经济，其作用也不大. 建议在类似悬臂式板桩墙的模型试验中，确定合理的插入比$\lambda<0.8$、上限值为1.6，与在软土中的模拟结果有一定的差异[2].

4) 基坑内土体位移场的分析

无支撑悬臂板桩墙深基坑开挖中，土体变形最大的区域位于表层部分，现提取埋深最浅，深度为50 mm的观测点来分析，如图6所示.

(1) 在开挖的前两阶段，所有测点变形极小；随着开挖的继续进行，该区域土体位移逐渐增大，直到基坑失稳破坏.

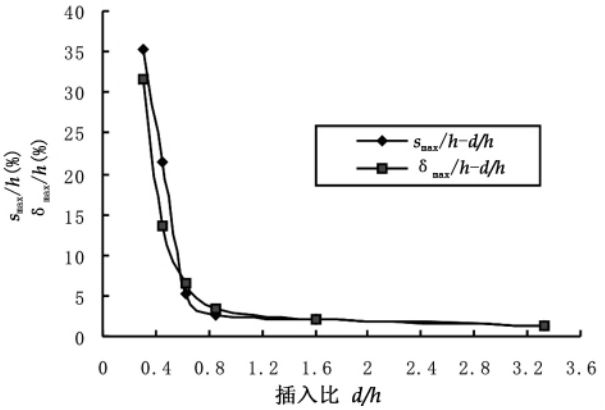

图5 悬臂开挖过程中地面沉降及板桩墙的相对变形图

(2) 当基坑开挖至500 mm深度，即$\lambda=3.333$时，板桩墙支护侧土体在深度250 mm、水平距离板桩墙200 mm范围内的水平位移出现的拐点，其主要原因是这个区域内的土体在第6开挖步内已经破坏，此时这部分土体的沉降要远远大于水平位移，致使水平位移出现峰值，不再保持递增性.

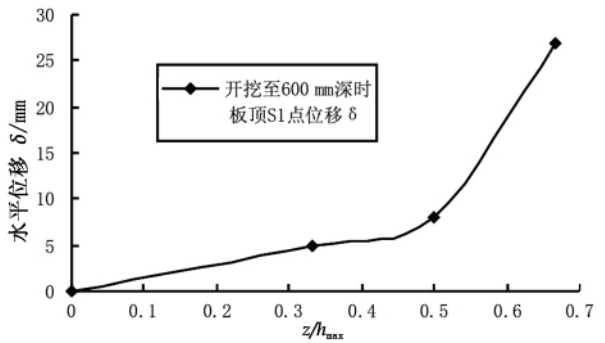

图6 单支撑的支撑位置对板桩墙顶S1点位移的影响曲线

(3) 进一步将埋深为150 mm、250 mm、400 mm的标志点绘成如图7进行分析可得：

① 基坑开挖对支护侧内部土体的影响范围大致在0.9 h以内，在此范围以外的部分，基坑开挖基本不会在这里产生沉降或者水平位移.

② 在基坑的每步开挖中，土体位移扰动范围随

超星·期刊

着埋深的增加逐渐减小; 同时基坑开挖的越深,对土体的扰动范围越大. 也反应了支护侧内土体的破坏变形曲线与三角形的滑移线(破裂线) 十分相似.

3.2　单支撑板桩墙开挖模型试验分析

1) 单支撑位置对基坑变形的影响

板桩墙的位移是引起支护侧土体变形的直接因素之一[5],单支撑的支撑位置对板桩墙位移的影响如图 6 所示. 图中支撑的位置 z/h_{max} 分别取 0、1/3、1/2、2/3,从图中可以看出设置在板顶的支撑对基坑变形的约束显著; 当支撑设置在 $z/h_{max}=2/3$ 处,板桩墙顶端产生的最大水平位移达到 27 mm,而支撑在 $z/h_{max}=0$ 处板顶没有位移产生,显然支撑位置是控制基坑变形的一个重要影响因子.

2) 单支撑对基坑土体变形影响分析

由于横向支撑设置在 $z/h_{max}=0$ 处时对土体的水平位移限制显著,那么其对基坑土体的沉降影响则如图 8,可知:

(1) 前 6 步的开挖对基坑的扰动较小,特别是图 8 与图 7 对比非常明显,在开挖至 500 mm 深时,悬臂式板桩墙已经倾覆失效,其产生的最大沉降为单支撑设置于板顶时的 15.6 倍,进一步体现了设置支撑的显著作用.

(2) 最后 2 步的开挖深度(100 mm) 仅有总深度的 16.7%,但所产生的沉降却占总沉降 80%,说明开挖至 600 mm 深度时已经超出基坑临界开挖深度; 并且从图中可以看出基坑支护失效时,沉降最为剧烈的位置发生在距离板桩墙 200 mm 处,成凹陷状,且土体沉降要远大于其水平位移.

(3) 在板的顶端设置支撑加上支护板桩墙下端有砂的良好嵌固作用,当插入比 $\lambda \geq 0.182$ 时,整个板桩墙侧移较小; 而当插入比 $\lambda < 0.182$ 时,由于支护板桩墙下端砂的嵌固作用减弱,板桩墙侧移较大,其失效形式为绕板桩墙顶端转动的“踢脚”型破坏,可见支护桩墙下端的良好嵌固作用不得忽视.

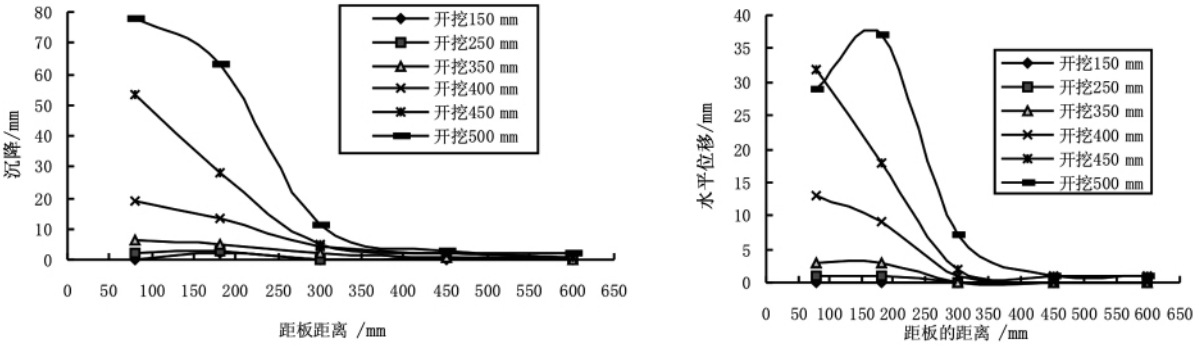

图 7　埋深 50 mm 土体内观测点在不同开挖阶段沉降及水平位移曲线图

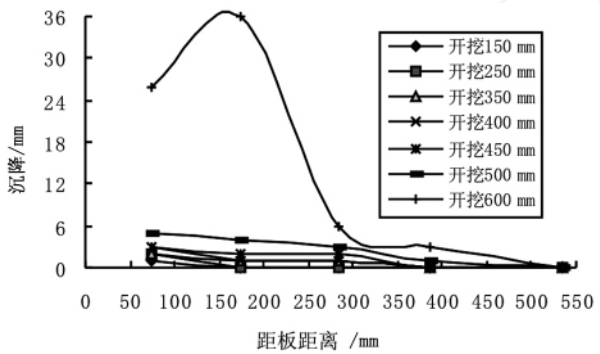

图 8　埋深 50 mm 处土体内观测点在不同开挖阶段沉降曲线图

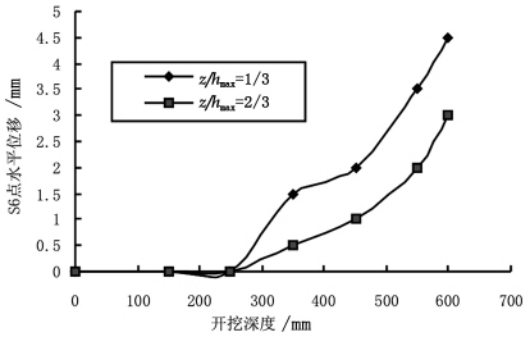

图 9　不同的第 2 道支撑位置对板桩墙 S6 点位移影响曲线

3.3　双支撑板桩墙开挖模型试验分析

为了探讨双支撑板桩墙模型双支撑的最佳搭配方案,方案 1 在板桩墙顶端设置第 1 道支撑,距板桩墙顶端 200 mm 处设置第 2 道支撑; 方案 2 在板桩墙顶端设置第 1 道支撑,距板桩墙顶端 400 mm 处设置第 2 道支撑; 两方案基坑开挖为 600 mm.

(1) 图 9 所反映的就是双支撑相互影响分析: 第 2 道支撑位置对板桩墙的位移有显著的影响,当

超星·期刊

支撑位于 $z/h_{max}=1/3$ 处的位移在整个开挖过程中都要大于 $z/h_{max}=2/3$ 处，所以第 2 道支撑位置设置在 $z/h_{max}=2/3$ 处更佳，偏上时对减小板桩墙下部位移作用不大.

(2) 设置双支撑对减小基坑变形具有良好的作用，通过试验数据分析可得：当第 2 道支撑设置在 $z/h_{max}=2/3$ 处，开挖至 600 mm 深时，其 δ_{max} 为 3 mm、土体最大水平位移为 3 mm、土体最大沉降为 5 mm；分别为单支撑在墙顶处（$h_{max}=600$ mm）的 18.75%、27.27%、13.89%，为无支撑悬臂开挖（$h_{max}=500$ mm）的 1.9%、8.11%、6.41%. 因此，合理的设置双支撑既能够有效的减小开挖对周围环境的影响，又具有明显的经济效益.

4 结语

(1) 在无支撑悬臂板桩墙支护深基坑开挖试验中，土体及支护结构的变形较大，特别是最后两次开挖影响显著，因此必须准确确定深基坑的开挖临界深度，留有一定的安全距离. 建议此种情况下合理插入比取值为 $\lambda<0.8$、上限值为 1.6. 基坑开挖对支护侧土体的扰动范围大致在 0.9 h 以内，该范围以外的土体基本不会在这里产生沉降或者水平位移.

(2) 在单支撑板桩墙模型开挖试验中，支撑设置在板桩墙顶端是控制地表土体水平变形的最好选择，在此处设置支撑再加上支护板桩墙下端土体的嵌固作用，对减小基坑变形具有良好的效果；但是当插入比 $\lambda<0.182$ 时，由于支护板桩墙下端的嵌固作用减弱，桩墙侧移较大，其破坏形式为绕桩墙顶端转动的“踢脚”型破坏.

(3) 双支撑板桩墙模型开挖试验中，第 2 道支撑位置对基坑的稳定有显著的影响，第 2 道支撑位置设置在 $z/h_{max}=2/3$ 附近更佳.

(4) 对减小基坑变形而言：设置双支撑（支撑分别设置在 $z/h_{max}=0$ 与 2/3 处）时效果最好，单支撑（支撑设置在 $z/h_{max}=0$ 处）次之，无支撑悬臂式最差.

参考文献：

[1] 俞 晓. 深基坑开挖与支护的模型试验与 ANSYS 分析研究 [D]. 武汉：武汉理工大学，2005.

[2] 徐少曼，李树华，等. 软土深基坑开挖的模型试验研究 [J]. 福建建筑，2000，增刊(70)：63－65.

[3] 李晓红，卢义玉，等. 岩石力学实验模拟技术 [M]. 北京：科学出版社，2007.

[4] 陆培毅，严 驰，等. 粘性土基于室内模型试验土压力分布形式的研究 [J]. 建筑结构学报，2002，23(2)：83－86.

[5] 史佩栋，等. 深基础工程特殊技术问题 [M]. 北京：人民交通出版社，2003.

Deformation Mechanism Analysis of the Pile Wall Supporting of Deep Excavation Based on the Model Test

LIN Peng[1], ZHENG Ming－xin[1], XIONG Xiao－bo[2], WANG Yan－hong[3], YANG Ping[1]

(1. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013; 2. Institute of Technology, Jinggangshan University, Ji'an 343009; 3. Nanchang Institute of Technology, Jiujiang 330401, China)

Abstract: The model test of the deep excavation under the two－dimensional surface strain condition is conducted, then the pile wall supporting deep pit in the cantilever supporting, single and double supporting forms are simulated. The displacement of the pile wall, the vertical displacement of the superficial soil, and the strain of soils are measured. Finally the insertion ratio λ of the pile wall, the influencing law with or without the support of cross direction and the support position are discussed, which provides some extremely useful reference for the future research.

Key words: deep foundation pit; excavation and support; model test; pile wall; deformation analysis

(责任编辑：刘棉玲)