

离心模型试验的连续墙变形影响因素

元翔, 宫全美, 周顺华

(同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要:以上海世博会世博轴及地下综合体工程1标段逆作法施工深大基坑为背景,为了更好的了解土体开挖对地下连续墙变形的影响,设计了反应上海软土蠕变效果的离心模型试验,并结合有限元对其中主要的影响因素—开挖时限、开挖顺序和纵向开挖宽度进行了分析计算。离心模型试验和监测数据表明,数值计算的结果与试验和现场实测出的地下连续墙水平位移值都比较接近,可以较好的反映基坑开挖的变形性状。研究表明:预留土台和中板对于地下连续墙的变形有很好的控制作用;由土体蠕变而产生的地下连续墙变形大部分发生在预留土台开挖后,在预留土台开挖后应尽快施作下层板结构,以减小由于土体蠕变而使地下连续墙产生的变形;浅3层预留土台的纵向开挖宽度宜小于深3层预留土台的纵向开挖宽度;采用跳挖方式开挖土台时,应先开挖地下连续墙附近无重点保护对象的区域。

关键词:基坑工程;地下连续墙;离心模型试验;有限元计算

中图分类号:TU 447 文献标志码:A 文章编号:1674-4764(2012)03-0039-08

Factors Influencing Deformation of Underground Diaphragm Wall in Deep Excavation Based on Centrifugal Model Test

YUAN Xiang, GONG Quanmei, ZHOU Shunhua

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, P. R. China)

Abstract: To know well the impact on the deformation of underground diaphragm wall caused by soil excavation, centrifugal model tests reflecting Shanghai soft soil creep effects were designed, and finite element was used to calculate the deformation of underground diaphragm wall caused by different excavation timeline, sequence and width based on the top-down construction method in the deep and large foundation pit of Shanghai Expo axis underground complex project. Centrifuge model tests and monitoring data indicate that the results of numerical calculation are approximately close to the horizontal displacement of the underground diaphragm wall measured in site, which reflects the deformation behavior of excavation. The results show that remained berm and middle plate have good control over the deformation of underground diaphragm wall. Most part of underground diaphragm wall deformation caused by soil creep occurs after the remained berm is excavated. So in order to decrease the deformation of underground diaphragm wall, it would be useful to conduct plate structures as soon as the remained berm is excavated. The excavation width of remained berm in the north part is less than that in the south part. It will be advisable to finally excavate the remained berm where there are protected objects nearby.

Key words: excavation engineering; underground diaphragm wall; centrifuge model test; finite element calculation

收稿日期:2011-11-22

基金项目:上海市科委科研重点攻关项目(10231200702)

作者简介:元翔(1984-),男,博士生,主要从事岩土工程方面的研究,(E-mail)tjyuanx@126.com。

基坑开挖过程是基坑开挖面上卸荷的过程,卸荷引起坑底土体产生以向上为主的位移,同时也引起围护结构在两侧压力差的作用下而产生水平位移。影响基坑围护结构变形的主要因素有:场地的水文地质与工程地质条件、基坑平面形状、基坑规模、周围环境条件(地面超载、周边建筑物、地下管线等)、墙体刚度、施工方法(挡墙、支撑的施工方法,施工质量,开挖顺序,挖土时机等)、墙体嵌固深度、支撑形式及平面刚度和支撑预应力大小等^[1]。一些学者如 Peck^[2]、Clough 等^[3]、Long^[4]、Ou 等^[5]、Yoo^[6]等基于大量工程实践对基坑围护结构变形作了研究,但一方面由于基坑工程具有很强的区域特性,其他地区的有关研究成果能否直接应用于上海地区的基坑工程变形预测尚有待探讨。庄丽等^[7]以上海铁路南站南广场大型放坡开挖基坑为例,采用有限元法对该基坑放坡和围护相结合的施工过程中土坡的蠕变变形、剪应力松弛和蠕变应变变化规律进行计算分析。结果表明,采用幂指数形式的蠕变方程进行软土放坡开挖基坑土坡长期暴露下的蠕变计算是可行的,并得出了土体开挖时间 10、150、300 d 时相对应的土体蠕变量。包旭范等^[8]分析了上海铁路南站南广场大型软土基坑预留土台的作用机理,得出了预留土台开挖宽度及土台加固与否对连续墙变形的影响规律;张辉等^[9]运用 FLAC^{3D} 对上海市轨道交通 10 号线国权路站一同济大学站区间下立交基坑开挖进行数值模拟,并对地下连续墙侧向位移实测值进行了分析,得出了地下连续墙的刚度、基坑被动区加固深度对围护结构的侧向水平位移的影响。金雪莲等^[10]利用有限元分析软件 ANSYS 对一典型带撑式基坑工程在开挖过程中的变形进行模拟分析,将模拟计算结果与实测值进行比较,验证该方法的可行性,并对影响基坑围护结构变形的几个主要因素进行了系统分析。冯虎等^[11]建立了上海地区 58 个开挖深度 19 m 以上超深基坑工程数据库,对围护结构水平位移特性进行了归一化最大水平位移值的特征、最大水平位移位置的特征、软土层厚度对变形的影响、墙趾土层对围护结构变形的影响等几方面的统计分析,得到了上海地区超深基坑围护结构一般变形规律和变形控制要点。兰守奇等^[12]通过对上海轨道交通 10 号线同济大学站基坑地下连续墙现场监测结果的分析,研究了基坑开挖深度与地下连续墙侧移及最大相对侧移的关系,同时给出了地下连续墙最大侧移及最大侧移位置随开挖时间的变化规律,并对不同测点的侧移结果进行分析比较。目前,大多数对于围护结构变形影响因

素的研究是针对围护结构的墙体刚度、墙体入土深度、支撑刚度、支撑位置等。但在实际工程中,土方开挖施工的工序对围护结构变形的影响也是十分明显的^[13-15]。

以上海世博会世博轴及地下综合体工程 1 标段大型软土基坑为背景,考虑上海地区灰色淤泥质黏土的蠕变现象^[16-18],结合离心模型试验,利用三维有限元进行分析计算,并与实测数据进行比较,通过对不同的土台开挖时限、不同的土台开挖顺序和不同的土台纵向开挖宽度对地下连续墙变形的影响进行分析,提出合理的土体开挖工序。

1 工程背景

上海世博会世博轴基坑工程位于浦东世博园区,连通两座地铁车站,1 个磁浮车站。总长度 1 048 m,宽 68~110 m,最大挖深 22 m。本文研究背景为世博轴及地下综合体工程 1 标段,基坑净尺寸为 205 m×110 m,分为深 3 层和浅 3 层两部分。工程场地标高为 +4.2 m,深 3 层开挖深度为 21.5 m,浅 3 层开挖深度为 17 m。浅 3 层外侧采用水泥土搅拌桩加固,基底采用旋喷桩加固;深 3 层坑外不加固,基底采用旋喷桩加固。本基坑工程采用中心岛放坡开挖并结合逆作的施工工艺。工程概况及基坑剖面见图 1 和图 2,主要土层物理力学参数见表 1。由于浅 3 层外侧采用水泥土搅拌桩作为挡墙,该区域基坑地下 1 层采用明挖,地下 2 层以下采用逆作法施工,围护结构采用地下连续墙,墙厚 1 m,深 33 m,施工顺序为先开挖至连续墙顶部以下 0.6 m(标高-1.68 m),然后施作第 1 层中板;待中板到达设计强度后,在第 1 层中板和预留土台(土台顶标高-3.48 m)的支撑下以 1:2.5 坡度开挖至第 2 层中板处(标高-7.3 m),施作基坑中部的第 2 层中板;待中板到达设计强度后,挖除预留土台,然后施作剩余的第 2 层中板;按上述方法继续开挖至坑底(标高-12.8 m),并施作底板。深 3 层坑外不加固,该区域基坑地下 1 层以下都采用逆作法施工,先施作顶板,中板和底板处的施工顺序与浅 3 层相同。

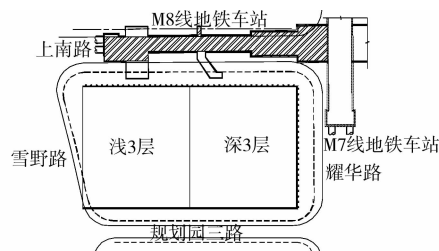


图 1 基坑周围环境

表 1 各土层的物理力学参数

层号	土层名称	厚度/m	天然重度/(kN·m ⁻³)	孔隙比 <i>e</i>	天然含水量 <i>w</i> /%	压缩模量/MPa	粘聚力/kPa	内摩擦角/(°)
① ₁	填土	1.2						
② ₁	褐黄~灰黄色粘土	2.4	18.5	0.911	31.7	4.89	21	19
③	灰色淤泥质粉质粘土	1.2(2.4)	17.3	1.198	42.3	3.27	12	19
③ _夹	灰色粘质粉土	1.2	18.1	0.972	34.4	11.05	5	29.5
④	淤泥质粘土	5.4	16.5	1.458	50.9	1.99	14	11
⑤ ₁	灰色粘土	4.0	17.4	1.195	41.8	3.06	14	15
⑤ ₂₋₁	灰色砂质粉土夹粉质粘土	24.2	18.1	0.938	32.4	8.91	4	29

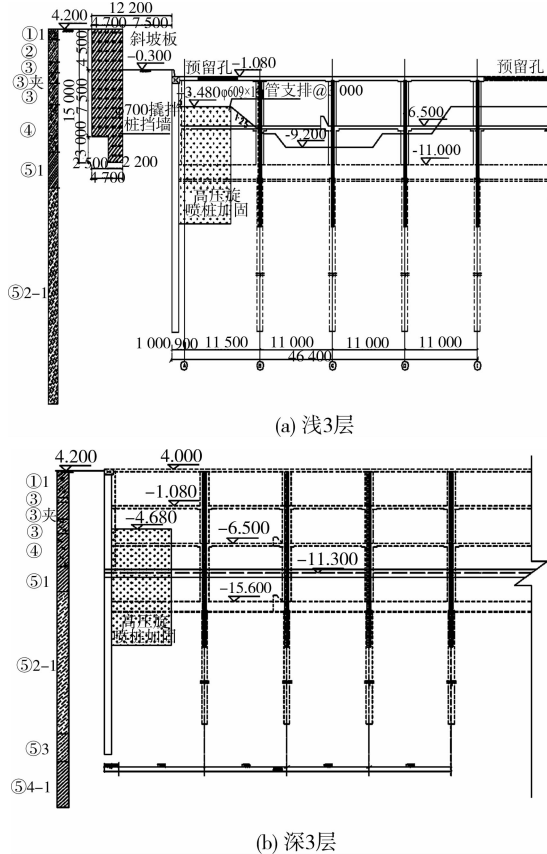


图 2 基坑横剖面图

2 离心模型试验

2.1 试验原理

离心模型试验的实质是用离心力来模拟自重效应。根据近代相对论的解释,牛顿的重力与惯性力是等效的,故原型在地球上受到的重力与模型在离心机上受到的离心力所产生的物理效应是一致的。由于惯性力与重力等效,且工程材料性质未变,从而使模型与原型的应力应变相等、变形相似、破坏机理相同,能再现原型特性^[8]。

2.2 试验过程

离心模型试验采用的是同济大学的 L-30 型离心机,该机的主要性能参数见文献[19]。根据模型箱的尺寸将模型率取为 140,试验用土为取自现场

的原状土。试验中控制模型土样的容重、含水量和土体的强度指标,将重塑后的土体在离心机内由下至上进行分层固结。在土样制备过程中,每一次同时固结两箱土样,其中一箱土样用于基坑开挖的离心模型试验,另外一箱土样专门进行土工试验,测试土体的物理力学参数,使模型土样各项控制指标的数值与现场值相近。根据抗弯刚度相似原则采用铝板模拟连续墙,铜棒模拟支撑。

根据实际工况,在模型试验中对基坑进行开挖,其中工况 2 到工况 3 仅观察由于预留土台无支护暴露 60 d 对地下连续墙变形的影响。根据试验结果照片,量测连续墙的水平位移。

2.3 试验结果

试验时通过同步摄像系统对模型在试验中的全过程进行监控,并拍摄模型的照片,见图 3。

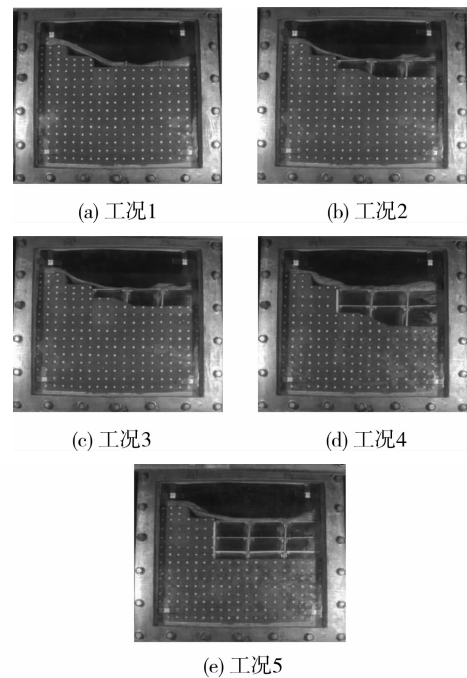


图 3 离心模型试验照片

通过图片软件处理分析试验照片,以获取所需要的特征点位移数据,见图 4。

从图 4 中可以看出,工况 2 到工况 3 基坑开挖

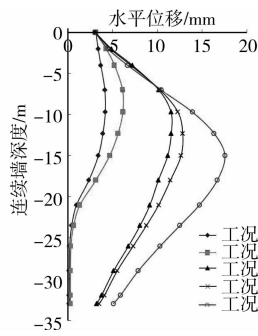


图 4 地下连续墙水平位移

均位于④层淤泥质粘土层中,随着预留土台无支护暴露时间的增加地下连续墙的水平位移明显增加,最大水平位移增加了 5 mm,而且地下连续墙底也产生了明显的水平位移。因此,在④层淤泥质粘土层中进行基坑开挖,应该考虑土体蠕变对基坑的影响。尽量缩短土体无支护暴露的时间,减小围护结构的变形。

3 蠕变方程及参数的选取

土的蠕变是指随时间而发展的变形过程,甚至在恒定的荷载下也是这样。任何一个蠕变阶段的持续期和它的作用依赖于土的类型和荷载值。不同的土及不同应力水平作用下的土的蠕变曲线是不同的。

大型通用软件 ANSYS 给出了采用隐式方程求解材料蠕变问题的时间硬化模型^[20]见式(1),

$$\dot{\epsilon}_t = C_1 \sigma_t^{C_2} t^{C_3} e^{-\frac{C_4}{T}} \quad (1)$$

式中: ϵ_t 为等效蠕变速率; σ_t 为等效应力; T 为绝对温度; $C_1 \sim C_4$ 均为常数,由材料性质等决定; t 为求解步的时间。

根据文献[7],得到上海淤泥质粘土的参数分别为: $C_1 = 1.89 \times 10^{-11}$, $C_2 = 1.57$, $C_3 = -0.89$, 不考虑温度影响时, $C_4 = 0$ 。

4 数值计算模型的建立

由于离心模型试验耗费的时间较多,且模型受到模型箱的限制,考虑不到超大型基坑的大面积卸载情况,因此结合前述离心模型试验结果以及现场的实测数据,采用 ANSYS 有限元计算方法对开挖时限、开挖顺序和纵向开挖宽度对连续墙变形的影响做进一步的分析。模型根据图 2 建立,考虑结果的合理性和计算模型规模的大小,将本工程深 3 层、浅 3 层都建立在该模型中,模型总尺寸为 330 m × 250 m × 75 m。浅 3 层连续墙深 33 m,深 3 层连续

墙深 43 m,预留土台宽 8 m,土台土体进行了加固,土体加固后的模量为原土体模量的 3 倍。综合考虑计算机容量和计算精度,坑外部分的网格划分相对较稀。采用八节点等参单元模拟土体,蠕变材料选取式(1)的隐式蠕变方程,方程中参数 t 按照表 2 选取。土体选用弹塑性模型,屈服准则采用 D-P 准则,计算参数按照表 1 选取。连续墙、支撑采用实体单元模拟,由于中板环向封闭且与中心岛相连,整体

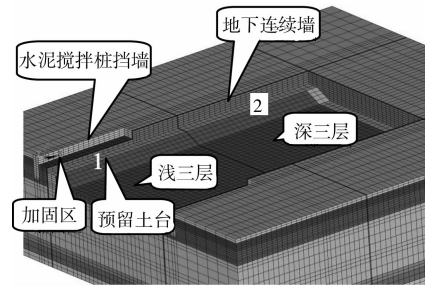


图 5 有限元模型

刚度较大,因此可简化为水平位移约束。数值计算过程中采用分步开挖,开挖步骤与前述实际工程的开挖步相同。建立的有限元模型如图 5 所示,

表 2 开挖标高及施工时间表

项目	基坑开挖面标高/m	时间/(d · 10 m ⁻¹)
-1.08 m 板	-3.93	5
-6.5 m 板	-7.3	2
-11.0 板	-13.2	2
从浇筑混凝土垫层到浇筑混凝土梁板		15
从浇筑混凝土土到得到设计强度		28

5 数值计算结果及分析

5.1 数值计算数据与离心试验和实测数据比较

对基坑开挖至-6.5m板时数值模拟与离心模型试验和监测数据的地下连续墙水平位移值进行比较,如图 6 所示。其中,浅 3 层和深 3 层地下连续墙分别位于图 7 断面 1 和断面 3 处。可以看出数值计算的结果与试验结果以及现场实测出的连续墙水平位移值比较接近,可以较好的反映基坑开挖的变形性状。

5.2 基坑暴露时间对连续墙变形的影响

首先,分析基坑暴露时间对地下连续墙变形的影响,将浅 3 层和深 3 层开挖至-6.5 m 板且挖掉第 1 块土台开始计算,暴露时间为 180 d。为分析地下连续墙典型断面变形随暴露时间增加的变化过程,选取了如图 7 所示的 5 个典型断面。计算结果如图 8 所示。由于离心模型试验耗费的时间较多,

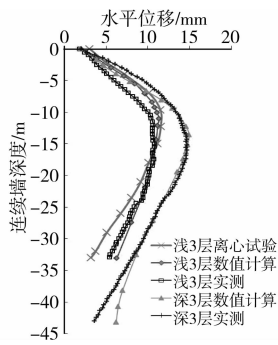


图6 数值计算数据与试验和实测数据比较

仅针对浅3层断面1观察了由于预留土台无支护暴露60 d对地下连续墙变形的影响。

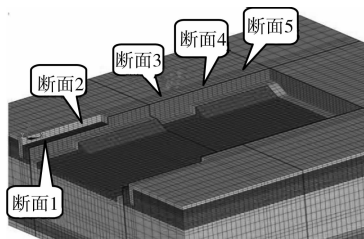


图7 计算典型断面图

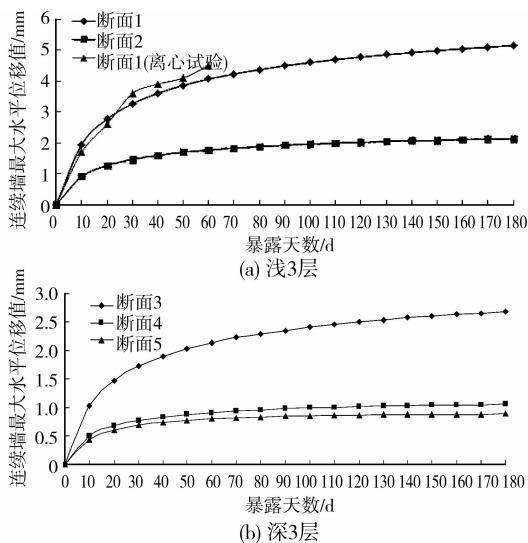


图8 不同断面连续墙最大水平位移随时间的变化曲线

由图8可以看出,通过离心模型试验得到的结果与数值计算得到的结果比较接近,连续墙的最大水平位移值随着暴露时间的增加不断增加。断面1和断面3处连续墙的最大水平位移在60 d内增加较快,之后增加速度减缓,并趋于收敛。断面2、4和5处连续墙的最大水平位移在30 d内增加较快,之后增加速度减缓,并趋于收敛。经过180 d的暴露,断面1、2、3、4、5处连续墙产生的最大水平位移值分别为5.2、2.2、1.2、0.9 mm。断面1处连续墙

产生的最大水平位移比断面2处连续墙产生的最大水平位移大141%。断面3处连续墙产生的最大水平位移比断面4、5处连续墙产生的最大水平位移分别大154%和203%。

由此可以看出,由于断面1和断面3处的预留土台已开挖,而断面2、4和5处仍留有预留土台,前两处断面的连续墙最大水平位移值和增加速率明显比后三处断面的连续墙最大水平位移值和增加速率大,可见预留土台对于连续墙的变形有很好的控制作用;开始暴露时,浅3层的-1.08板已形成,深3层的+4.2板和-1.08板已形成,深3层的开挖深度大于浅3层的开挖深度,而由于土体蠕变所产生的连续墙最大水平位移却远小于浅3层,可见中板对于连续墙的变形也具有很好的控制作用。

5.3 预留土台开挖方式对连续墙变形的影响

其次,分析预留土台开挖方式对连续墙变形的影响。预留土台分块如图9所示,土台宽度33 m,跳挖方案如下:

方案1:先开挖第1、4块,再开挖第2、5块,再开挖第3、6块。

方案2:先开挖第2、5块,再开挖第1、4块,再开挖第3、6块。

方案3:1次开挖第1、2、3、4、5、6块。

方案4:先开挖第1块,再开挖第2块,再开挖第3块...最后开挖第6块。

计算结果,如图10所示。

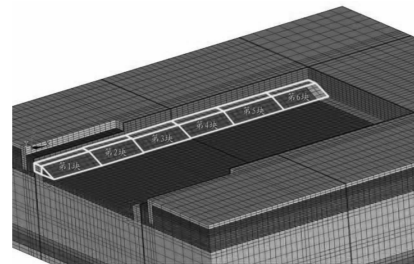


图9 预留土台分块图

由图10可以看出,对于不同的跳挖方案,方案3连续墙的水平位移最大,方案4连续墙的水平位移最小,断面1、2、3、4和5处连续墙水平位移可分别减小14%、15%、15%、13%和16%,方案1和方案2连续墙的水平位移值介于方案3和方案4之间。

方案1和方案2一次开挖为两块土块,方案3一次开挖为6块土块,方案4一次开挖为一块土块。因此为减小土台开挖而引起的连续墙变形,同时开挖的土块体积不应太大。从方案1和方案2中可以看出,当采用跳挖开挖土台时,首先开挖的土块区对

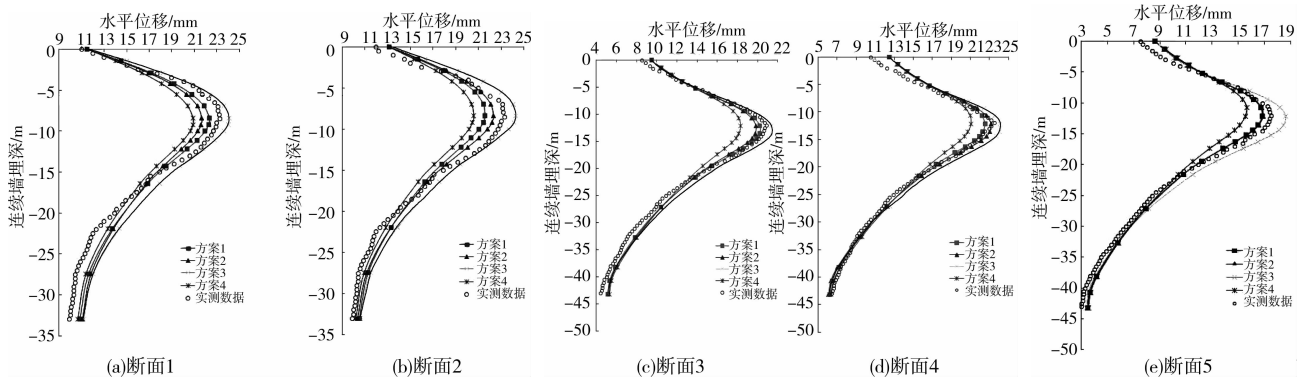


图 10 不同方案各断面的连续墙水平位移图

应的连续墙变形量大,因此在分块开挖施工中建议先开挖连续墙附近无重点保护对象的区域。

在实际工程中,预留土台的开挖采用了上述方案中的跳挖方法,通过图 10 中各个断面数值模拟与实测数据的对比可以看出两者的位移值比较接近,但是由于工程的复杂性,在连续墙的最大水平位移

上理想的数值模拟解略微偏小。

5.4 预留土台纵向开挖宽度对连续墙变形的影响

再次,分析预留土台纵向开挖宽度对连续墙变形的影响。分别对预留土台纵向开挖宽度为 30、25、20、15、10 m 进行计算分析。计算结果,如图 11、图 12 所示。

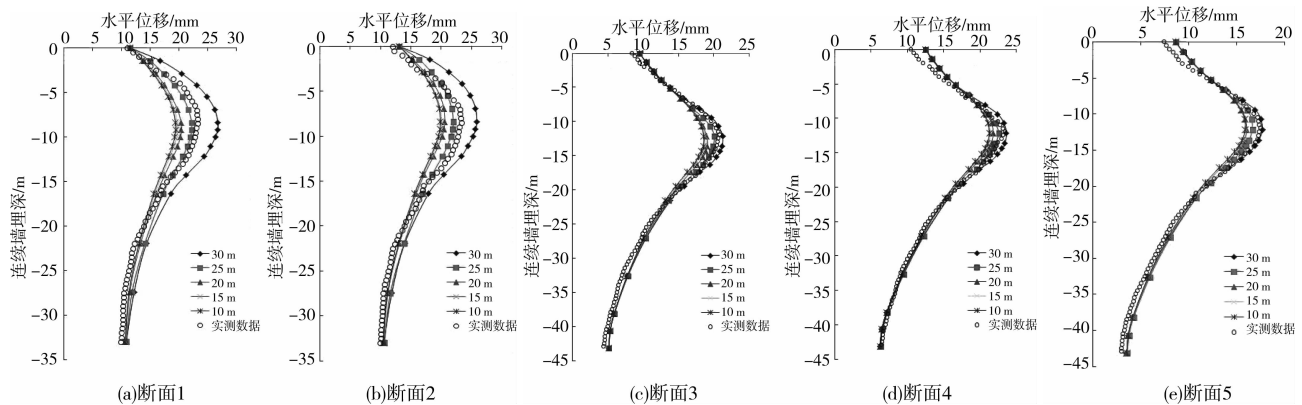


图 11 不同纵向开挖宽度下各断面的连续墙水平位移图

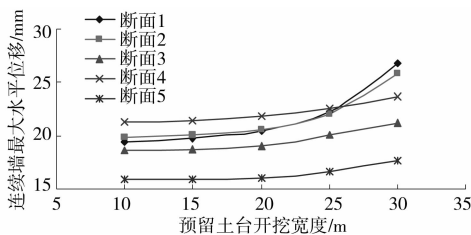


图 12 各断面不同纵向开挖宽度下连续墙最大水平位移比较图

由图 11、图 12 可以看出,断面 1 和断面 2 处当土台纵向开挖宽度大于 20 m 时,连续墙的水平位移增加很快,在土台纵向开挖宽度小于 20 m 时,连续墙的水平位移变化不大。深 3 层处断面 3、断面 4 和断面 5 的连续墙由于比浅 3 层处断面 1 和断面 2 的连续墙多一道 +4.2 板,所以土台的纵向开挖宽度对于深 3 层处连续墙的变形影响不大,土台纵向开挖宽度从 10 m 增加到 30 m,连续墙的最大水平位

移平均只增加了 9%。而浅 3 层处当土台纵向开挖宽度从 10 m 增加到 30 m 时,连续墙的最大水平位移平均增加了 38%。浅 3 层预留土台的纵向开挖宽度宜为 20 m,深 3 层预留土台开挖时由于中板已形成封闭的结构体系,具有较大的刚度,有效地控制了连续墙的水平变形,考虑到较大的纵向开挖宽度方便施工的进行,因此深 3 层预留土台的纵向开挖宽度宜为 30 m。

在实际工程中,根据上述预留土台的纵向开挖宽度建议进行施工,通过图 11 中各个断面数值模拟与实测数据的对比可以看出浅 3 层数值模拟值略小于实测数据,深 3 层数值模拟值与实测数据基本一致,均能较好的反应出连续墙的变形性状。

6 结 语

1) 由于土体的蠕变而产生的地下连续墙变形

80%以上发生在预留土台开挖后的60 d内,在这段时间中地下连续墙的最大水平位移增加较快,60 d后趋于稳定。所以在预留土台开挖后应尽快施作下层板结构,土方开挖与结构施工必须严密配合,以减小由于土体蠕变而使地下连续墙产生的变形。

2)预留土台和中板对于地下连续墙的变形有很好的控制作用。

3)开挖预留土台时,为减小土台开挖而引起的地下连续墙变形,同时开挖的土块体积不应太大,当采用跳挖方式开挖土台时,应先开挖地下连续墙附近无重点保护对象的区域。

4)浅3层预留土台的纵向开挖宽度宜为20 m,深3层预留土台开挖时由于中板已形成封闭的结构体系,具有较大的刚度,有效地控制了地下连续墙的水平变形,考虑到较大的纵向开挖宽度方便施工的进行,因此深3层预留土台的纵向开挖宽度宜为30 m。

参考文献:

- [1] 刘建航,侯学渊. 基坑工程手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1997.
- [2] Peck R B. Deep excavation and tunneling in soft ground [C]//Proceedings of the 7th international conference on soil mechanics and foundation engineering. Mexico City: State-of-the-Art-Volume, 1969: 225-290.
- [3] Clough G W, O'ROURKE T D. Construction induced movements of in situ walls [C]// Proceedings of ASCE conference on design and performance of earth retaining structures. New York: Geotechnical Special Publication, No. 25, 1990: 439-470.
- [4] Long M. Database for retaining wall and ground movements due to deep excavations [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127 (3): 203-224.
- [5] Ou C Y, Hsieh P G, Chiou D C. Characteristics of ground surface settlement during excavation [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1993, 30 (5): 758-767.
- [6] Yoo C. Behavior of braced and anchored walls in soils overlying rock [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127 (3): 225-233.
- [7] 庄丽,周顺华,宫全美,等. 大面积软土基坑放坡开挖引起蠕变的数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25 (S2): 4209-4214.
ZHUANG Li, ZHOU Shunhua, GONG Quanmei, et al. Numerical analysis of creep induced by excavating slope in soft soil pit with large area [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25 (S2): 4209-4214.
- [8] 包旭范,庄丽,吕培林. 大型软土基坑中心岛法施工中土台预留宽度的研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(10): 1208-1212.
BAO Xufan, ZHUANG Li, LYU Pei-lin. Study on mound width remained during the construction of central island for large foundation pits in soft soils [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28 (10): 1208-1212.
- [9] 张辉,熊巨华,曾英俊. 长条形基坑地下连续墙侧向位移数值模拟及其影响因素分析[J]. 结构工程师, 2010, 26(1): 80-86.
ZHANG Hui, XIONG Juhua, ZENG Yingjun. Numerical simulation and influence factor analysis on lateral displacement of diaphragm wall in long-narrow pit [J]. Structural Engineers, 2010, 26(1): 80-86.
- [10] 金雪莲,樊有维,李春忠. 带撑式基坑支护结构变形影响因素分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(S1): 3242-3249.
JIN Xuelian, FAN Youwei, LI Chunzhong. Analysis of factors affecting support structure deformation of foundation pit with brace [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(S1): 3242-3249.
- [11] 冯虎,刘国彬,张伟立. 上海地区超深基坑工程地下连续墙的变形特性[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6 (1): 151-156.
FENG Hu, LIU Guobin, ZHANG Weili. Deformation properties of diaphragm walls associated with excavation of ultra-deep foundation pits in shanghai [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(1): 151-156.
- [12] 兰守奇,张庆贺. 地铁车站深基坑地下连续墙变形监测[J]. 低温建筑技术, 2009(6): 81-83.
LAN Shouqi, ZHANG Qinghe. Monitoring on performance of diaphragm wall due to deep excavation of subway station [J]. Low Temperature Construction Technology, 2009, (6): 81-83.
- [13] 王桂平,刘国彬. 考虑时空效应的软土深基坑变形有限元分析[J]. 土木工程学报, 2009, 42(4): 114-118.
WANG Guiping, LIU Guobin. Finite element analysis of the deformation of deep excavations considering time-space effect in soft soils [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(4): 114-118.
- [14] 刘艳,刘国彬,孙晓玲,等. 考虑时空效应的软土地区深基坑变形分析[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(S0): 1433-1436.
LIU Yan, LIU Guobin, SUN Xiaoling, et al. Analysis of deformation laws by using the rule of time-space effect in soft soil excavation [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(S0): 1433-1436.

- [15] 高文华, 杨林德, 沈蒲生. 软土深基坑支护结构内力与变形时空效应的影响因素分析[J]. 土木工程学报, 2001, 34(5): 90-96.
GAO Wenhua, YANG Linde, SHEN Pusheng. Analysis of factors on time-space effect of internal force and deformation for retaining structure of deep foundation pit under soft soil [J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34(5): 90-96.
- [16] 康林. 浅析“时空效应”理论在上海地铁 M8 线延吉中路站土方开挖中的应用[J]. 安徽建筑, 2006(3): 93-95.
KANG Lin. Brief analysis of “space-time effect” application in earth excavation of Middle-Yanji-Road station of shanghai subway line M8 [J]. Anhui Architecture, 2006(3): 93-95.
- [17] 王文. 基于时空效应的基坑施工有限元研究[J]. 陕西理工学院学报: 自然科学版, 2009, 25(2): 62-65.
WANG Wen. Deep excavation FEM simulation based on time-space theory [J]. Journal of Shanxi University of Technology: Natural Science Edition, 2009, 25(2): 62-65.
- [18] 李俊才, 张倬元, 罗国煜. 深基坑支护结构的时空效应研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(5): 812-816.
LI Juncai, ZHANG Zhouyuan, LUO Guoyu. Study on effects of time-space of retaining structures of the deep-foundation pit excavation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(5): 812-816.
- [19] 杨龙才, 王炳龙, 周顺华, 等. 基坑边坡变形和稳定性的离心试验研究[J]. 上海铁道大学学报, 2000, 21(10): 100-105.
YANG Longcai, WANG Binglong, ZHOU Shunhua, et al. Centrifugal model test for deformation and stability of pit slope [J]. Journal of Shanghai Tiedao University, 2000, 21(10): 100-105.
- [20] Kohnke P. Ansys theory reference [R]. [S. l.]: Ansys Inc., 2002.

(编辑 胡玲)

(上接第 33 页)

- HONG Zhenshun, LIU Songyu, YU Xiaojun. On destructure of structured soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(5): 684-687.
- [13] Terzaghi K. Fifty years of subsoil exploration [C] // Proc 3rd Int Conf Soil Mech Found Engng, Zurich 1, Harvard University, 1953: 227-238.
- [14] Silverstri V. Preconsolidation pressure of Champlain clays Part II. Laboratory determination [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1984, 21(3): 600-602.
- [15] Liu M D, Carter J P, Desai C S. Modeling compression behavior of structured geomaterials [J]. International Journal of Geomechanics, 2003(3): 191-204.
- [16] 刘维正, 石名磊, 缪林昌. 基于扰动状态概念的结构土压缩特性分析[J]. 岩土力学, 2010(11): 3475-3480.
LIU Weizheng, SHI Minglei, MIAO Linchang. Analysis of compressibility of structural soils based on disturbed state concept [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010(11): 3475-3480.
- [17] 孔令伟, 吕海波, 汪稔, 等. 某防波堤下卧层软土的工程特性状态分析[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(4): 454-458.
KONG Lingwei, LYU Haibo, WANG Ren, et al. Analysis on engineering property of underlying soft soil stratum of a breakwater [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(4): 454-458.
- [18] Hong Z S, Onitsuka K. A method of correcting yield stress and compression index of Ariake clays for sample disturbance [J]. Soils and Foundations, 1998, 38(2): 211-222.
- [19] Shogaki T, Kaneko M. Effects of sample disturbance on strength and consolidation parameters of soft clay [J]. Soils and Foundations, 1994, 34(3): 1-10.

(编辑 胡英奎)