

文章编号:1673-9469(2015)02-0014-05

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2015.02.004

地连墙变形影响因素分析及支撑设计研究

袁爱平^{1,2},孙兴凯²,张涛²

(1.北京科技大学土木与环境工程学院,北京100083;2.北京市保障性住房建设投资中心,北京100040)

摘要:结合工程实例,利用有限元分析软件 PLAXIS 模拟地下连续墙设计参数,探讨不同设计对地连墙变形影响大小及差异,并根据分析结果对支撑设计方法进行优化。结果表明:适当增加墙体刚度,可以有效减小地连墙侧移;如满足地连墙最小入土深度,再增加入土深度意义不大;用混凝土支撑替换钢支撑、增加支撑刚度、减小支撑水平间距以及必要时在竖直方向上增加一道支撑对减小墙体变形具有较好的作用;同时对基坑周围软弱土体及结构薄弱区域进行土体加固对控制基坑变形效果明显。

关键词:地铁深基坑;变形;有限元分析;支撑设计;PLAXIS

中图分类号:U231.3

文献标识码:A

Influence factor of underground continuous wall degeneration and its support design research

YUAN Ai-ping^{1,2}, SUN Xing-kai², ZHANG Tao²

(1 Civil and Environmental Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing, 100083;

2 Beijing City Affordable Housing Construction Investment Center, Beijing, 100040)

Abstract: Based on the engineering example of Nanjing city gate of Wuding subway foundation pit, the paper uses the finite element analysis software PLAXIS to simulate the design parameters of underground continuous wall. The influences of the different factors on underground continuous wall were discussed. The support design method was optimized by according to the comparison results. The results show that increasing the stiffness of diaphragm wall can effectively reduce the lateral displacement of underground continuous wall; if the depth of underground continuous wall meet with the minimum depth, then increasing the depth is of little significance; the concrete support replace steel support, which could increase the support stiffness, reduce the horizontal spacing and adding a layer of support along the vertical direction when it is necessary, which has good effect on reducing the deformation of diaphragm wall; At the same time, the soil reinforcement to the weak soil around pit surrounding and structure risk areas has a very good effect to control the deformation of foundation.

Key words: subway deep excavation; deformation; finite element analysis; support design; PLAXIS

地铁是城市重要的交通干线,而地铁车站则是地铁线上的重要节点,地铁车站一般位于城市中心区,周围建筑密集、地下管线众多、环境保护要求高,而地下空间的开发严格意义上属于三维空间问题,但是在实际处理过程中都是按照平面问题来处理,其基坑支护的合理设计与施工,确保工程安全和经济合理,已成为交通工程界、岩土工程界的重要研究课题之一^[1-4]。围护结构变性影响因素分析以及其结论都会对支撑设计有很大

影响,很多学者都是利用模拟软件对其进行仿真,本文通过对施工过程中的变量进行控制,研究支撑架设,对基坑施工更具有直观的指导作用。

1 工程概况

1.1 工程概述

南京地铁三号线北起江北新城,南至东山新城,穿越长江,连接江北火车站、南京火车站、南京

收稿日期:2014-12-10

基金项目:长江学者和创新团队发展计划项目(IRT0950)

作者简介:袁爱平(1980-),男,江西新余人,博士,工程师,从事岩土工程设计、施工及管理工作。

南站、南京禄口机场等重要的对外交通枢纽,线路总长 44.83 km,其中高架线 2.4 km,地下线 42.4 km。鸡鸣寺站位于北京东路与太平北路交叉口,车站沿太平北路布置,为地下三层岛式站台车站。鸡鸣寺站基坑周长 171.6 m,标准段外包总宽 22.3 m,开挖深度 26 m,车站采用明挖顺作、局部盖挖顺作法施工,采用 1 000 mm 地下连续墙作为车站主体围护结构,平均桩长 34.2 m,嵌入中风化岩层 ≥ 1.5 m,车站自上而下共采用五道支撑,第一、第四道水平支撑采用 1000 mm \times 1000 mm 钢筋混凝土支撑,第二、三、五道支撑采用壁厚为 16 mm,直径为 $\Phi 609$ mm 的钢支撑。

1.2 工程地质条件

鸡鸣寺站地处秦淮河古河道及河漫滩相,土层主要为砂性土和黏性土,厚度一般为 30 ~ 37 m,深部为侏罗纪砂岩,局部破碎(见表 1)。

2 地连墙变形影响因素分析

2.1 地下连续墙设计参数对基坑变形的影响

为了分析地连墙刚度对基坑变形的影响,本文将有限元模型^[5-6]中地连墙刚度分别取原参数的 0.1、0.5、1、5、10 倍进行分析,不同刚度下基坑开挖至 26 m 时地连墙深层水平位移情况(见图 1)。

当刚度由 1 倍减小到 0.2 倍时,地连墙深层水平位移会明显增大;当刚度继续减小到 0.1 倍时,地连墙深层水平位移出现了显著的增大,说明在基坑支护结构设计时,地连墙的刚度必须满足基本强度要求;而当刚度由 1 倍增加到 5 倍的时候,地连墙深层水平位移变化量并未出现明显的

减小,说明本工程支护结构设计是安全的,也证明了当刚度达到一定程度时,继续增加刚度对控制变形帮助并不大。

在基坑支护结构设计中,地连墙底部需嵌入基底以下足够深度且进入较好的土层,入土深度如果过小,则可能会发生底鼓或者渗流等现象,但入土深度过大,就会增加工程投资,造成不必要的浪费。在软土层中地连墙入土深度需要达到或大于开挖深度才能满足稳定性要求,如果地连墙底部进入密实的砂层或者岩层时,地连墙入土深度可以大大减少。为了研究不同入土深度对基坑变形的影响,根据岩层深度 32 m 以及开挖深度 26 m,分别取地连墙的深度为 30、32、34、36、38 m,即入土深度分别为 4、6、8、10、12 m,插入比分布范围为 15.4% ~ 46.4%,计算这五种情况下地连

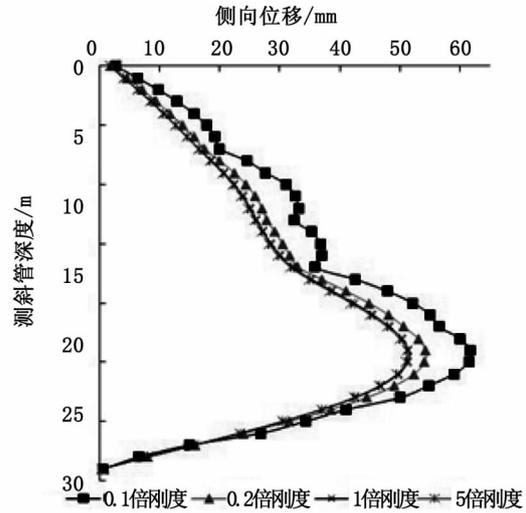


图1 地下连续墙不同刚度下的变形
Fig.1 Deformation of underground continuous wall with different stiffness

表 1 鸡鸣寺站岩土层分布表

Tab.1 Soil parameters of Jimingsi pit

层号	土层名称	颜色	状态	厚度范围/m
○1-1b	杂填土	黄灰灰色	松散 稍密	0.70 ~ 4.00
○2-2b3	素填土	灰黄色	松软	1.80 ~ 2.00
○3-1c2-3	粉土夹粉砂	灰色	稍密局部中密	0.60 ~ 7.30
○42d3	粉砂夹粉土	灰色	稍密局部中密	4.10 ~ 9.50
○5-3d2	粉质粘土	灰黄色	中密	5.10 ~ 8.90
○6-3b1-2	粉土夹粉质粘土	灰色局部灰黄色	硬塑局部可塑	3.70 ~ 6.00
○7-3c1-2	粘土	青灰色	中密局部密实	1.10 ~ 4.00
○8-3a2-3	粉质粘土夹粉土	灰色	可塑软塑	1.40 ~ 3.90
○9-4b2	粘土	灰色	可塑	0.60 ~ 1.80
○10-4a2-3	混合土	青灰色 局部灰黄色	软塑	0.50 ~ 1.60
○11-4e1	强风化砂岩	紫灰色	密实	0.70 ~ 8.40
○12J1-2xn-2s	中风化砂岩	紫灰色	密实	

墙的变形情况并加以对比,结果如图2。

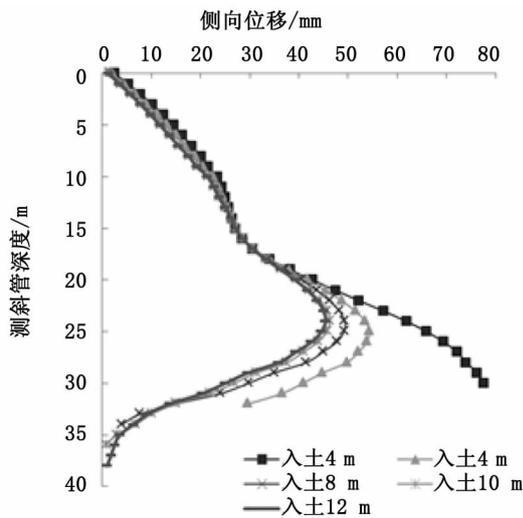


图2 地下连续墙不同入土深度下变形

Fig.2 The deformation of underground continuous wall with different buried depths

当入土深度由4 m 逐渐增加到12 m 过程中地连墙变形在逐渐减小,入土深度为10、12 m 时,变形最大值均在44 mm 左右,变形的减小效果就不甚明显。因此,增加地下连续墙入土深度可以有效控制基坑变形,但达到一定深度时,再增加入土深度对控制变形的效果就不大了。地下连续墙的入土深度在满足抗渗流稳定性验算、抗隆起稳定性验算、基坑整体抗倾覆稳定性验算、抗滑动稳定性验算等要求的前提下,将基坑变形控制在安全范围之内,就可以选择合理的入土深度了。鸡鸣寺站深基坑地连墙深度为34 m,并未选择更大的36 m、或者38 m,是在综合考虑基坑稳定性、基坑变形、造价等因素后选择的,从变形监测数据看,地连墙的入土深度选择是合理的。

2.2 土体参数对基坑变形的影响

基坑工程中在开挖之前对基坑结构转角部位进行土体加固,有研究资料^[2]表明经过高压旋喷加固后的土体刚度能达到原状土的2.5倍。本文假设加固后土体弹性模量为原状土体的2.5倍,其他参数保持不变,计算基坑变形,结果见图3。

研究表明:土体弹性模量对地下连续墙的变形以及地表沉降的影响是显著的,当弹性模量增加时,地下连续墙深层水平位移明显减小,地表沉降也显著减小。可见,土体弹性模量是影响基坑变形的主要因素,基坑工程施工时对软弱土体以及结构危险区域进行土体加固对控制基坑变形具有很好的效果。

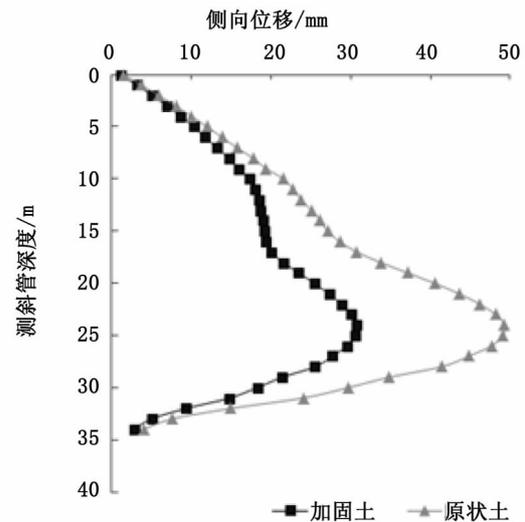


图3 加固土体对地下连续墙变形的影响

Fig.3 Effect of reinforced soil on deformation of underground continuous wall

3 支撑设计研究

3.1 支撑材料的选择

地连墙内支撑有钢支撑与混凝土支撑两种形式。钢支撑的优点是安装和拆除简单、施工速度快、自重较轻、拆除后可以重复使用,此外钢支撑安装后可以立即达到预定强度,起到支撑作用,这样可以减少基坑暴露时间并控制基坑变形。但是钢支撑的节点构造比较复杂,如果安装的时候操作不当,会造成节点变形或传力不直接而引起基坑变形过大。因此,采用钢支撑时,需要重视节点的整体性以及提高施工技术水平。

现浇混凝土支撑结构具有刚度大、整体性好的优点,此外混凝土支撑的布置方式比较灵活,适合应用于平面形状不规则的基坑,而且混凝土支撑不会出现节点松动的问题,施工质量比较容易得到保证,所以混凝土支撑应用也较广。但是现浇混凝土支撑需要在现场绑扎钢筋笼、安装模板、浇筑混凝土,然后对混凝土进行养护,当混凝土支撑达到一定强度后,才能继续向下开挖。因此混凝土支撑施工周期较长,在制作期间基坑处于无支撑暴露状态。而且,混凝土支撑拆除后清理工作量较大,不能重复利用。

鸡鸣寺站主体结构基坑第一、四道支撑为钢筋混凝土支撑,其余为钢支撑。在工程实例中^[7],深层支撑较少采用混凝土支撑。为了研究第四道混凝土支撑以及不同支撑材料对地连墙变形的影响,控制其他影响因素一致,分别考虑各道支撑全

为刚结构支撑、各道支撑全为混凝土支撑、首道为混凝土支撑其余支撑各有一道为混凝土支撑情况下基坑变形情况。如图4不同支撑材料下地连墙深层水平最大值及地表沉降最大值。

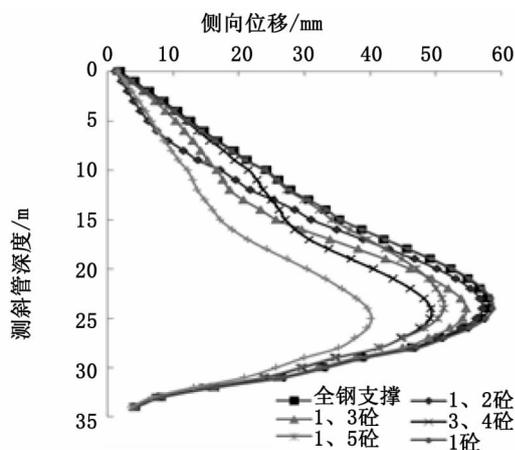


图4 不同支撑材料下地连墙变形情况

Fig.4 Deformation of underground continuous wall with different support material

从图4中可以看出:仅第一道支撑采用混凝土支撑时地连墙水平位移最大值为57.68 mm,距桩顶24 m。对比第四道支撑采用混凝土支撑形式的计算值,地连墙最大位移增大了14%,最大值位置没有改变,可见采用混凝土支撑可以减小地连墙的变形。此外在实际施工中钢支撑架设时先开挖到支撑平面下1 m,然后再架设钢支撑,存在超挖现象,而混凝土支撑仅开挖到支撑平面处,这也是实际监测时采用钢支撑形式的基坑变形较大的原因之一。

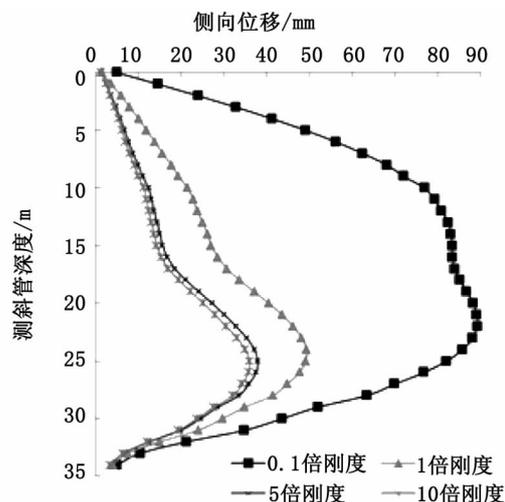
综上所述,在支撑设计时仅第一道支撑采用混凝土支撑,对控制基坑变形意义不大;当基坑变形控制要求或周围环境保护要求较高时,可以采用首道混凝土支撑搭配地连墙0.5倍长度附近加一道混凝土支撑形式。

3.2 支撑刚度研究

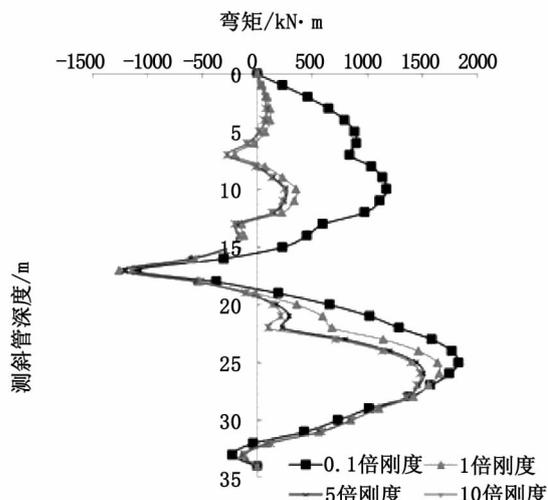
钢支撑以及钢筋混凝土支撑具有不同的型号,常见的钢支撑型号有 $\phi 609 \text{ mm} \times 16 \text{ mm}$ 、 $\phi 609 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ 以及 $\phi 580 \text{ mm} \times 16 \text{ mm}$,钢筋混凝土支撑也可以采用不同的截面尺寸,常见的有 $600 \text{ mm} \times 800 \text{ mm}$ 、 $800 \text{ mm} \times 1\,000 \text{ mm}$ 、 $1\,000 \text{ mm} \times 1\,200 \text{ mm}$ 。本文分别计算支撑刚度为原来的的0.1、1、5、10倍这四种情况下基坑变形,计算结果如图5。

当支撑刚度由0.1倍变为10倍时,地下连续墙变形、弯矩以及地表沉降都逐渐减小,说明增加

支撑刚度可以有效控制基坑变形;当支撑刚度由1倍减小到0.1倍时,地下连续墙侧移最大值增加了82%,地表沉降增加了117%,说明支撑刚度不足会显著增加基坑变形;当支撑刚度由10倍减少至0.1倍时,地下连续墙深层水平位移最大值位置由-25 m逐渐上升到-22 m,说明刚度的变化也会影响地下连续墙位移最大值的位置。



(a) 地下连续墙变形情况



(b) 地下连续墙弯矩

图5 不同支撑刚度下地下连续墙变形、弯矩图

Fig.5 deformation, bending moment diagram of underground continuous wall with different support stiffness

3.3 支撑竖向间距研究

研究表明^[3],深基坑工程支撑布设一般遵循“上疏下密”要求,而本工程第四道支撑与第五道支撑间距为5 m,第五道支撑与坑底距离为4 m。在第四道支撑安装之后变形明显增加,这一现象除了与基坑暴露时间有关还和深层支撑竖向间距

不够密有关。本文分析了第五道支撑位于不同深度时开挖至坑底地下连续墙的水平位移情况,以及增加一道钢支撑即前四道支撑位置及型式不变,第五道支撑位于 -20 m 处,第六道支撑位于 -23 m 处开挖至坑底地下连续墙的水平位移情况(见图6)。

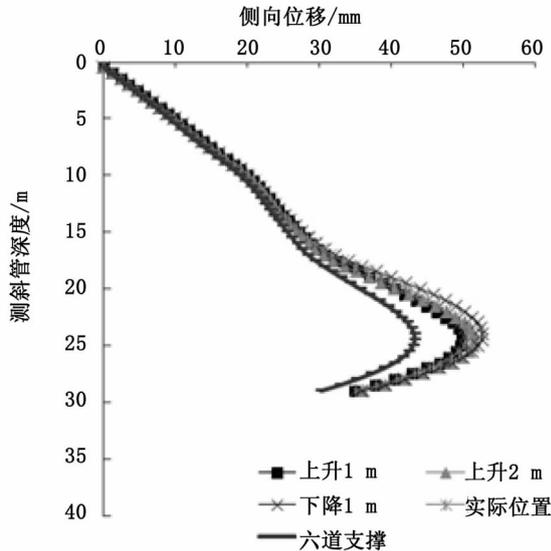


图6 地下连续墙在不同支撑竖向间距下的变形

Fig.6 Deformation of underground continuous wall in different vertical spacing of support

因变形曲线区别不大,表明第五道支撑位置对地连墙水平位移最大值,以及水平位移最大值的位置影响不大。而架设第6道支撑后地连墙水平位移最大值为距桩顶 24.5 m 处的 43.18 mm ,比架设五道支撑减少了 14.4% ,可见架设六道支撑可以有效控制地连墙的变形。缩小支撑间距,可以减少基坑无支撑暴露时间,符合时空效应原理^[4]。

3.4 支撑横向间距研究

支撑的横向间距与支撑体系的整体刚度也密切相关,支撑横向间距的变化对基坑工程的变形以及地连墙的内力具有一定影响,本文分析了不同支撑横向间距下的地连墙变形情况(见图7)。

当支撑横向间距减小 1 m 时,地连墙侧移最大值减小了 4.6 mm ,当支撑横向间距增大时,地连墙侧移最大值增加了 3.7 mm 。说明当支撑横向间距增大的时候,地连墙深层水平位移也在增大。虽然支撑横向间距小的时候,基坑变形小、稳定性高,但是过小的支撑间距会对施工造成不利影响^[6],而且增加投资;当支撑横向间距增加,基坑开挖方便,有利于缩短工期以及减少投资。因此在基坑工程支护结构设计中,应综合考虑,如在

基坑周围环境保护要求较高时,可以采用不均匀的支撑横向间距,适当增加某些区域的横向间距以及加密其他区域的支撑,既方便施工、保证工期,又可以有效控制基坑的整体变形^[7]。

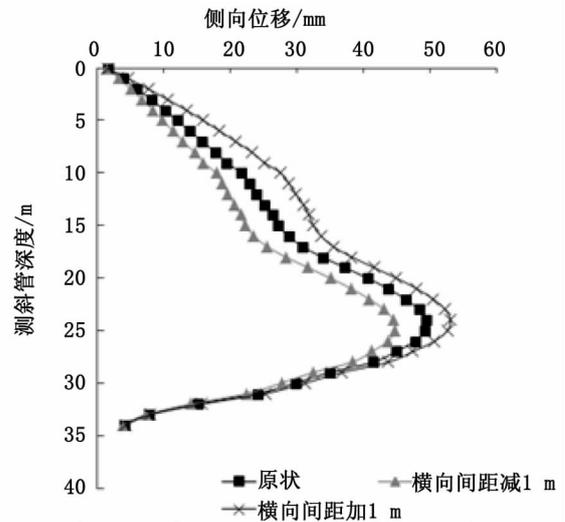


图7 地下连续墙在不同支撑横向间距下的变形

Fig.7 Deformation of underground continuous wall at different lateral spacing of support

4 结论

- 1)适当增加地连墙刚度,如增加墙厚度,可以有效减小地连墙侧移。
- 2)需要保证地连墙的一定的人土深度,再增加入土深度意义不大。
- 3)用混凝土支撑替换钢支撑、增加支撑刚度、减小支撑水平间距以及必要时在竖直方向上增加一道支撑对减小地连墙变形具有较好的作用。

参考文献:

- [1]郑荣跃,曹茜茜,刘干斌,等.深基坑变形控制研究进展及在宁波地区的实践[J].工程力学,2011,28(2):38-53.
- [2]郑宏,葛修润.关于岩土工程有限元分析中的若干问题[J].岩土力学,1995,16(3):7-12.
- [3]周贺.土岩组合地区深基坑开挖地表沉降变形研究[D].青岛:中国海洋大学,2011.
- [4]喻军华,金伟良,邹道勤.分析初始地应力场的位移函数法[J].岩土力学,2003,24(3):417-419.
- [5]徐奴文.地铁车站深基坑开挖与支护有限元数值模拟[D].大连:大连理工大学,2008.
- [6]李云安,张鸿昌.深基坑工程变形控制及其影响因素的有限元分析[J].水文地质工程地质,2001,28(4):1-5.
- [7]王场.内撑式车站深基坑开挖变形分析及支撑方案优化研究[D].郑州:河南工业大学,2011.

(责任编辑 王利君)