

复杂环境地铁深基坑地下连续墙变形分析

陆 超, 郑坚杰

(上海市建设工程安全质量监督总站, 上海 200032)

摘要: 为了研究复杂工程环境条件下地铁深基坑地下连续墙的变形规律, 文章以南京地铁 5 号线福建路站主体深基坑为背景, 按照地下连续墙是否入岩、两侧建筑荷载分布以及地下连续墙不同厚度 3 个条件, 选取 5 个典型剖面, 采用 Plaxis 2D 有限元建模分析地下连续墙变形规律, 并结合现场实测地下连续墙位移数据进行对比。结果表明: 地下连续墙入岩通过限制墙趾变形进而减小整体围护的水平位移, 且随岩面的抬升效果更明显; 基坑周边建筑物偏载作用下, 上口有整体向另一侧位移的趋势; 1 000 mm 厚地下连续墙较 800 mm 厚地下连续墙变形总体小 1/5 ~ 1/3; 基坑内土体含水率的流失和各施工工序的时间加长, 会加大地下连续墙的变形; 此外, 车站基坑端头并受“空间效应”影响, 采用平面模型计算得出的结果会偏大。

关键词: 深基坑; 地下连续墙; 建筑荷载; 岩面变化; 变形分析; 有限元

中图分类号: TU753.3; TU94⁺1

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2025)10-0081-08

doi: 10.13402/j.gcjs.2025.10.129

Deformation analysis of underground continuous wall of subway deep foundation pit in complex environment

LU Chao, ZHENG Jianjie

(Shanghai Municipal Safety and Quality Supervision Administration for
Construction Engineering, Shanghai 200032, China)

Abstract: In order to study the deformation law of underground continuous walls in deep foundation pits of metro under complex engineering environmental conditions, this paper takes the main deep foundation pit of Fujian road station of Nanjing metro line 5 as the background. According to three conditions: whether the underground continuous wall enters the rock, the distribution of building loads on both sides, and the different thicknesses of the underground continuous wall, five typical sections are selected. The deformation law of the underground continuous wall is analyzed by using Plaxis 2D finite element modeling, and compared with the on-site measured displacement data of the underground continuous wall. The results show that the underground continuous wall entering the rock reduces the horizontal displacement of the overall enclosure by restricting the deformation of the wall toe, and the effect is more obvious with the uplift of the rock surface. Under the eccentric loading of the surrounding buildings of the foundation pit, there is a tendency for the upper opening to shift as a whole to the other side. The deformation of a 1 000 mm thick underground continuous wall is generally 1/5 to 1/3 smaller than that of an 800 mm thick underground continuous wall. The loss of moisture in the soil within the foundation pit and the prolonged duration of each construction process will increase the deformation of the underground continuous wall. In addition, the end well of the station foundation pit is affected by the “spatial effect”, and the result calculated by the planar model will be larger.

Key words: deep foundation pit; underground diaphragm wall; building load; rock face change; deformation analysis; finite element

收稿日期: 2025-01-06

作者简介: 陆超(1992—), 男, 工程师, 从事建设工程质量、安全监督管理工作。

通信作者: 郑坚杰(1992—), 男, 工程师, 从事建设工程监督管理工作。

地铁深基坑工程施工过程中,地下连续墙围护结构的变形与工程和环境风险息息相关^[1]。影响地下连续墙变形的因素有:建筑物及车辆交通荷载等周边环境;设计阶段地下连续墙刚度、插入比、支撑间距和预应力取值;施工阶段基坑有无支撑暴露的时间等^[2-8]。

刘小丽等^[9]、蒋宏鸣等^[10]、姚远等^[11]研究采用 Plaxis 2D 有限元软件,对多种工况条件下地铁深基坑开挖期间的地下连续墙变形和应力进行了理论分析。曹丙柄等^[12]、孙根强^[13]分析了绍兴和天津具体深基坑工程项目监测数据,提出减小地下连续墙变形的建议:围护结构厚度与深度优化、施工期间加快基坑封底、减少无支撑暴露时间、减小周边荷载。徐洪钟等^[14]、武进广^[15]、刘方克等^[16]分别研究了南京市、杭州市粉砂土基坑、深圳填海地层、汕头海域围堰地质以及青岛土岩组合地层这些典型地域性地质条件下的围护结构变形规律。

然而,能在一个项目上同时反映环境、设计和施工对地下连续墙围护变形的影响分析情况较少。本文以南京地铁 5 号线福建路站主体深基坑为例,结合该项目复杂工程地质条件和周边环境,研究分析不同地下连续墙厚度、深度与墙趾入岩情况、不同周边环境荷载对围护结构变形的影响,可为类似工程提供参考。

1 工程背景

1.1 工程概况

南京地铁 5 号线福建路站为地下两层(局部三层)车站,主体外包总长度为 338 m,标准段宽度为 23.1 m,停车线段宽度为 10.7 m,负二层标准段底

板埋深为 17.7~19 m,负三层处理深为 23.3 m。

车站所处环境复杂,周边建、构筑物有原中华邮政总局旧址、先行施工地铁 7 号线福建路站、肯定之星假日酒店、电信物业 287 大楼、鲁迅园小区、荣氏企业、矿路学堂遗址、江苏省物资大厦、同达大厦、天和大厦、民宅、南京政治学院;此外,基坑开挖施工期间场地极为苛刻。为满足施工场地及社会交通需求,在主体基坑范围两侧均设置盖板,并有四处栈桥相互连通。车站周边环境及基坑开挖期间交通如图 1 所示。

1.2 工程地质与水文地质

施工场地处于秦淮河漫滩区,拟建车站范围上部普遍覆盖新近沉积粉砂、粉土及黏性土,地层平面分布不稳定,基岩埋深起伏变化较大。从上往下地层岩土分层主要为①填土、②-1d3 稍密粉砂、②-2c3 稍密粉土、②-3c2-3 稍密~中密粉土、②-4b2-3 可塑~软塑粉质黏土、②-2d2-3 稍密~中密粉砂、②-5e 软塑~可塑含砾粉质黏土、J1-2x-2 强风化岩及 J1-2x-3 中风化岩,车站范围地质纵剖面图如图 2 所示。

场地地下水的类型主要有上部松散层中孔隙潜水和基岩风化带裂隙水,无承压水,潜水平均高程与基岩裂隙水水头均为 8.7 m,历史最高潜水水位接近地表。

2 基坑方案及研究剖面选择

2.1 车站基坑支护方案

本车站采用地下连续墙+内支撑围护体系,主要为 800 mm 厚度地下连续墙,三层基坑及北端头井为 1 000 mm 厚度,地下连续墙深度为 22.4~

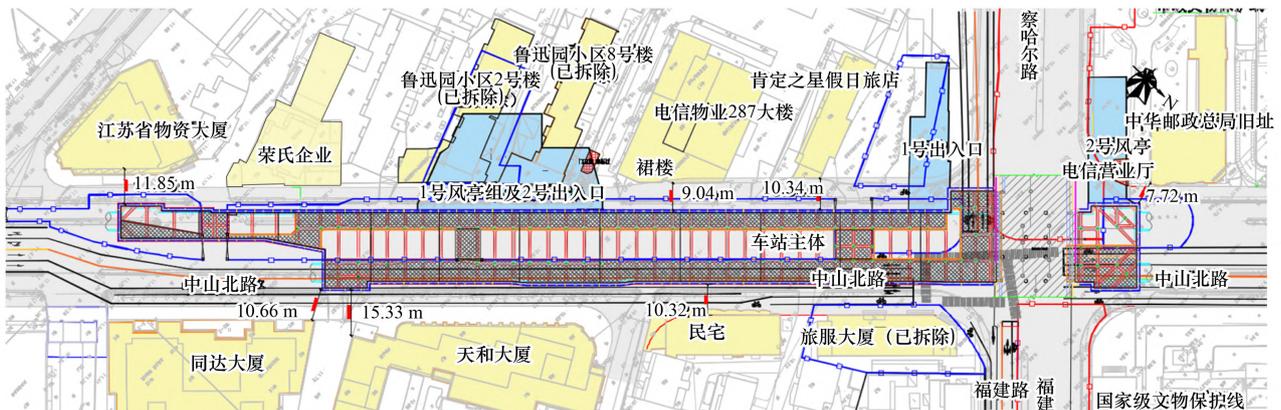


图 1 车站总平面



(a) 西侧剖面 (含停车线段); (b) 东侧剖面

图 2 车站地质纵剖面图

46 m, 所有地下连续墙底部进入隔水层, 接头为工字钢。

车站两层基坑范围竖向设置五道支撑加一道换撑, 其中第一道均为钢筋混凝土支撑, 另北端头井第三道也为混凝土支撑, 其余采用钢支撑; 换乘节点三层基坑处竖向设置六道支撑加一道换撑, 第一、四道支撑采用钢筋混凝土支撑, 其余采用钢支撑。停车线段混凝土支撑间距 9 m, 主体段混凝土支撑间距 6 m, 钢支撑间距均为 3 m, 基坑支护方案如图 3 所示。

2.2 车站基坑开挖次序

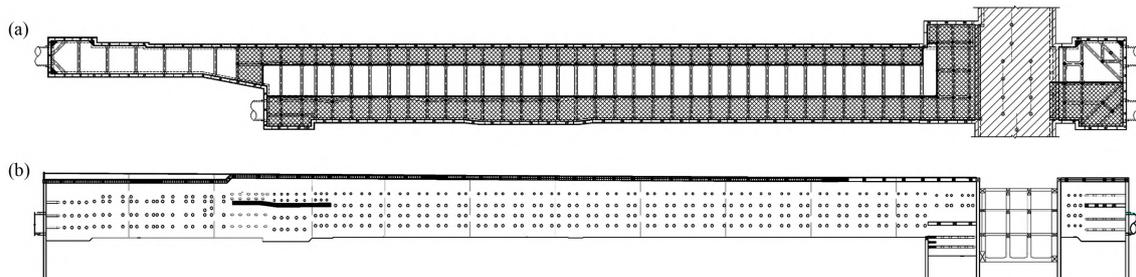
本车站主体基坑于 2022 年 4 月 10 日开挖, 2023 年 4 月 25 日开挖完成, 土方开挖周期长; 其中路口南侧基坑由南往北分层分段开挖, 北端头井与负三层节点处对称开挖。

2.3 研究剖面选择

由于该车站深基坑所处场地岩面起伏大, 地下连续墙围护结构存在墙趾不入岩和入岩两种形式; 且周边建筑物复杂, 对基坑两侧会产生无荷载、单侧荷载和双侧荷载 3 种类别的影响; 另外,

本基坑设计的地下连续墙厚度有 0.8 m 和 1.0 m 两种规格。

结合上述岩面起伏、两侧建筑物荷载和地下连续墙厚度的变化, 选取 5 个典型剖面进行研究分析, 各剖面的具体位置如图 4 所示。其中: 剖面 1 位于停车线端头井处, 地下连续墙不入岩(停车线段地下连续墙素墙起隔水作用, 进行受力变形分析时, 仅考虑正常配筋部分地下连续墙, 属于不入岩类别), 两侧不考虑建筑物荷载(物资大厦为桩基础, 故不考虑对地面的附加荷载作用), 对应测斜点位为 ZQT20(西侧)、ZQT18(东侧); 剖面 2 位于停车线标准段, 地下连续墙不入岩, 西侧为荣氏企业(条形基础、6 层), 对应测斜点位为 ZQT22(西侧)、ZQT17(东侧); 剖面 3 位于主体标准段, 地下连续墙入岩, 西侧为电信物业 287 大楼(裙楼为浅基础、3 层), 东侧为民宅(条形基础、7 层), 对应测斜点位为 ZQT30(西侧)、ZQT07(东侧); 剖面 4 位于主体标准段, 地下连续墙入岩, 西侧为肯定之星假日酒店(浅基础、5 层), 对应测斜点位为 ZQT33(西侧)、ZQT05(东



(a) 基坑首道混凝土支撑平面图; (b) 基坑支护纵剖面图

图 3 基坑支护图

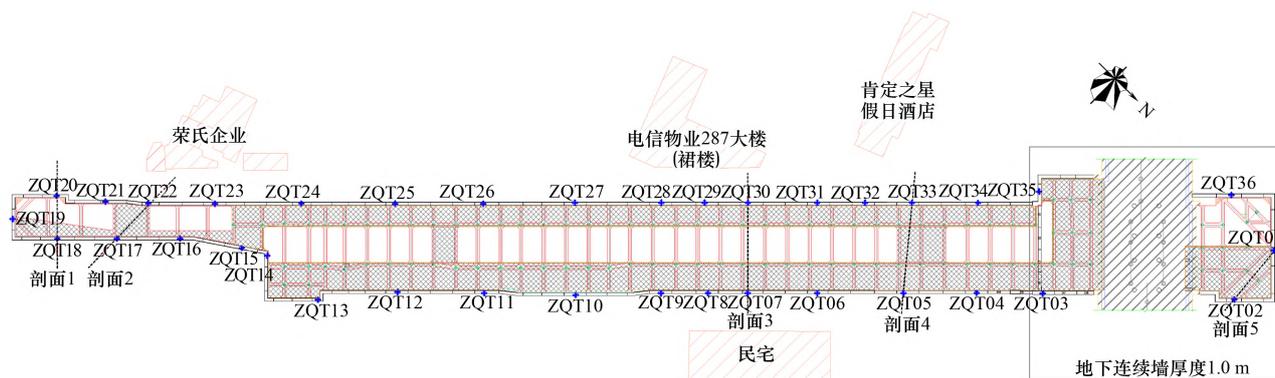


图 4 研究剖面平面位置

侧); 剖面 5 位于北端头井, 地下连续墙不入岩, 两侧不考虑建筑物荷载, 对应测斜点位为 ZQT02 (西侧)、ZQT02 (东侧)。以上仅剖面 5 地下连续墙厚度为 1.0 m, 其余 4 个剖面地下连续墙厚度均为 0.8 m, 各典型剖面情况汇总如表 1 所示。

3 Plaxis 2D 施工过程模拟

采用 Plaxis 2D 分析软件建立有限元模型, 对

该车站典型断面进行模拟计算分析, 模型尺寸设置为 150 m \times 50 m。岩土材料采用各向同性 HS - small 模型, 围护结构采用线弹性模型, 初始水位为地面以下 1m 处。各岩、土层物理力学性质如表 2 所示。表中: γ 为容重, kN/m³; e 为孔隙比; E_s 为压缩模量, MPa; c 为黏聚力, kPa; ϕ 为内摩擦角, ($^{\circ}$); μ 为泊松比。围护结构物理力学参数如表 3 所示。

表 1 典型剖面情况汇总

序号	墙趾	建筑荷载	墙厚度/m	测斜点位
剖面 1	不入岩	无	0.8	ZQT20、ZQT18
剖面 2	不入岩	单侧	0.8	ZQT22、ZQT17
剖面 3	入岩	双侧	0.8	ZQT30、ZQT07
剖面 4	入岩	单侧	0.8	ZQT33、ZQT05
剖面 5	不入岩	无	1.0	ZQT01、ZQT02

表 2 岩、土层物理力学性质

层号	γ	e	E_s	c	ϕ	μ
①	18.5	0.70	3.00	10.0	10.0	0.30
②-1d3	19.3	0.70	12.20	5.0	29.2	0.29
②-2c3	18.1	0.97	8.54	7.7	26.3	0.31
②-2d2-3	19.0	0.76	10.90	8.1	29.0	0.29
②-3c2-3	18.0	0.98	7.48	9.9	23.7	0.31
②-4b2-3	19.5	0.71	6.10	26.8	18.3	0.31
②-5e	20.0	0.70	6.50	30.0	15.0	0.26
J11-2x-2	22.5	0.60	24.00	10.0	28.0	0.23
J11-2x-3	24.8	0.50	60.00	60.0	35.0	0.22

表 3 围护结构物理力学参数

部位	密度/(kg \cdot m ⁻³)	弹性模量/GPa	泊松比
地连墙	2 500	32.5	0.23
混凝土支撑	2 500	31.5	0.23
钢支撑	7 980	200.0	0.30

各剖面模型建立步骤: 根据地质剖面图定义土层→施加建筑物荷载(若有)→地下连续墙施工(重置位移)→表层土开挖→第一道混凝土支撑施工→第一层土方开挖→第二道钢支撑架设→第二层土方开挖→第三道钢支撑架设→第三层土方开挖→第四道钢支撑架设(其中剖面 5 为混凝土支撑)→第四层土方开挖→第五道钢支撑架设→第五层土方开挖。

根据现场情况, 周边建筑物按每层 20 kPa 考虑荷载; 对于土方分层开挖底标高, 除最后一层外, 其余各层深度为支撑中心标高下方 0.5 m 处, 具体深度如表 4 所示, 基坑内部水位随土方开挖同步降低至开挖面; 各工序时间间隔为: 单层土

方开挖时间为 1 d, 混凝土支撑施工时间 4 d, 养护时间 7 d, 第二、三、四、五道钢支撑架设时间按 0.3、0.4、0.5、0.6 d 考虑。采用 plaxis 2D 建立各剖面有限元模型, 如图 5 所示。

4 模型计算结果及分析

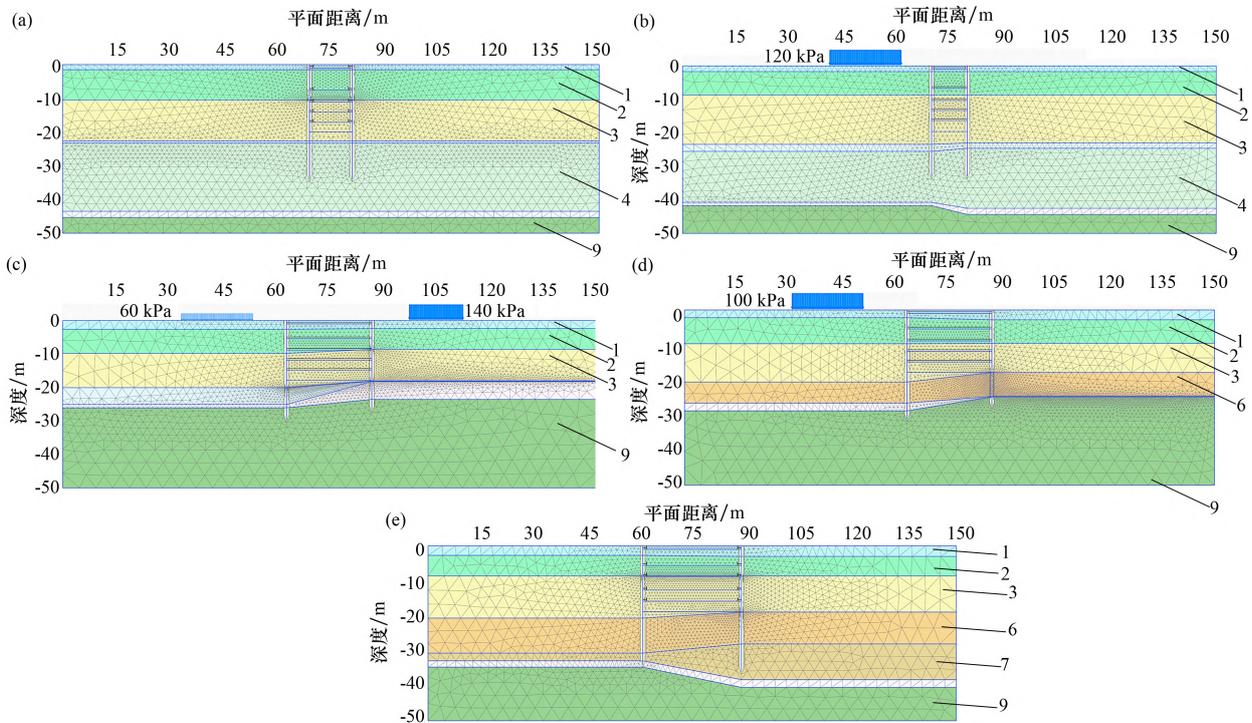
通过 plaxis 2D 有限元模型, 计算得到基坑开挖到底阶段, 各个剖面累计水平变形云图和地下连续墙位移图如图 6, 以下各剖面左边为西侧, 右边为东侧; 地下连续墙变形向东侧为正值, 向西侧为负值。

4.1 单侧建筑物荷载下围护变形规律

本项目选取的剖面 2 和剖面 4, 都是属于单侧

表 4 各层土方开挖深度汇总 m

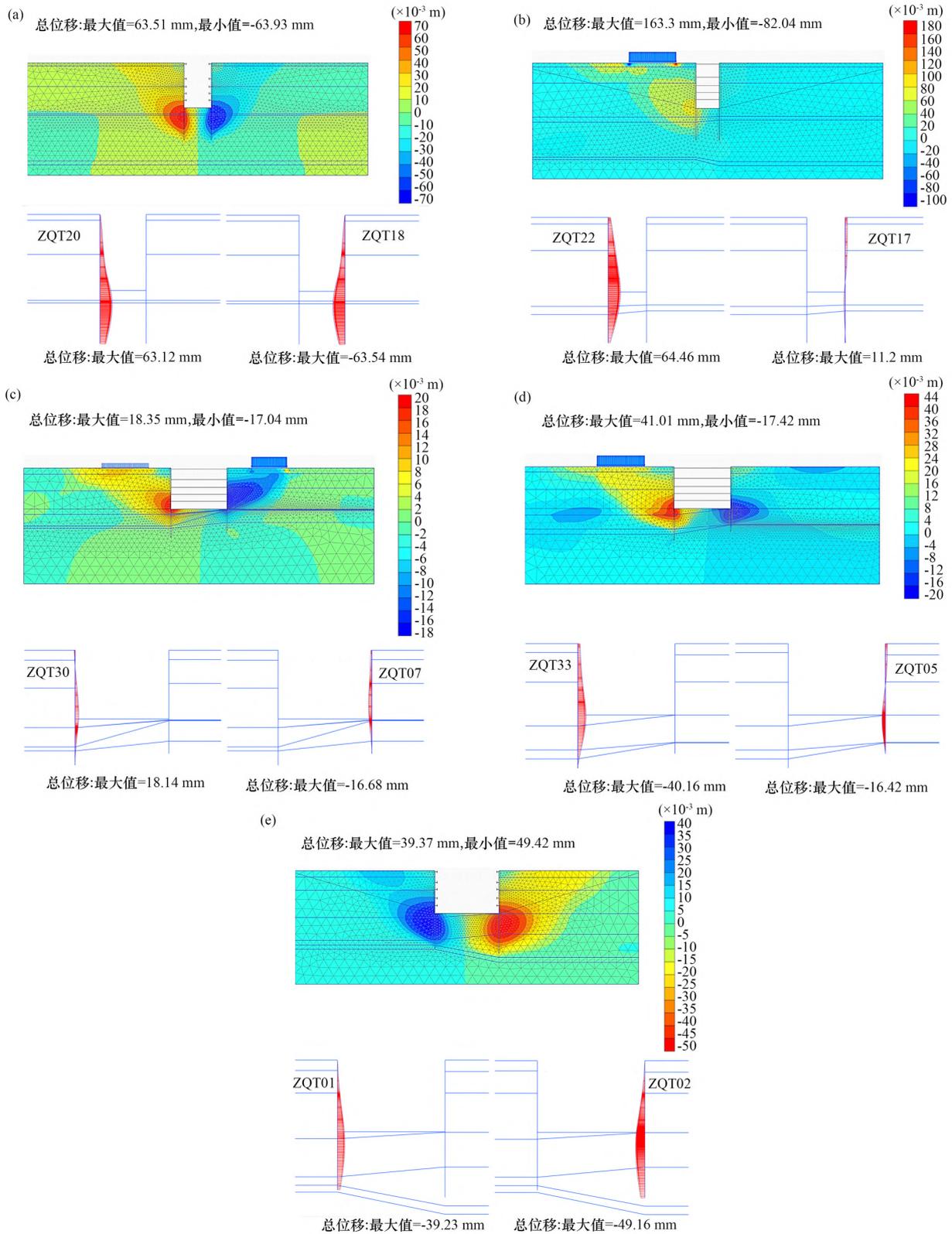
土层	剖面 1	剖面 2	剖面 3	剖面 4	剖面 5
表层土	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
第一层	7.6	6.8	5.3	5.3	5.6
第二层	11.1	10.3	8.8	8.8	8.6
第三层	14.1	13.3	11.8	11.8	12.6
第四层	17.1	16.2	14.7	14.7	15.8
第五层	20	19.2	17.7	17.7	18.8



(a) 剖面 1; (b) 剖面 2; (c) 剖面 3; (d) 剖面 4; (e) 剖面 5

1—填土; 2—-1d3 粉砂; 3—-2c3 粉土; 4—-2d2-3 粉砂; 5—-3c2-3 粉土; 6—-4b2-3 粉质黏土; 7—-5e 含砾粉质黏土; 8—J11-2X-2 强风化岩; 9—J11-2X-3 中风化岩。

图 5 各剖面有限元模型



(a) 剖面 1; (b) 剖面 2; (c) 剖面 3; (d) 剖面 4; (e) 剖面 5

图 6 各剖面水平变形云图和地下连续墙位移

建筑物荷载的情况。根据计算结果：两个剖面的地下连续墙位移最大值均发生在基坑底附近标高；剖

面 2、4 存在建筑物荷载一侧地下连续墙位移分别达到 64.46 mm 和 40.16 mm，而无建筑物荷载一侧

地下连续墙位移仅为 11.2 mm 和 -16.42 mm, 存在建筑物荷载一侧的地下连续墙位移远大于无建筑物一侧; 在无建筑物荷载一侧的地下连续墙上部, 是朝基坑外变形方向为坑外, 说明建筑物偏载作用下, 基坑上口有向另一侧位移的趋势。当然, 围护结构位移的大小还受基坑开挖深度、地质与水位变化、地下连续墙墙趾是否入岩以及建筑物荷载大小有关。

4.2 单侧建筑物荷载对围护变形的影响

对比剖面 1 和剖面 2, 两者围护与支撑类似, 剖面 1 开挖深度较剖面 2 深 0.8 m, 剖面 2 较剖面 1 西侧存在 120 kPa 建筑物荷载。可以看出: 当基坑两侧均无建筑荷载作用时, 剖面 1 地下连续墙上口几乎无水平位移; 剖面 1 开挖深度更深, 围护结构插入比较剖面 2 小, 地下连续墙底部水平位移也更大; 虽然剖面 2 较剖面 1 浅, 受单侧建筑物荷载的作用, 地下连续墙位移最大值达到 64.46 mm, 略大于剖面 1 最大值的 63.54 mm。

4.3 地下连续墙入岩对围护变形的影响

对比剖面 2 和剖面 4 西侧, 当地下连续墙墙趾入中分化岩时, 墙趾水平位移为 0; 对比剖面 3 东侧和剖面 4 西侧, 可以看出, 在开挖深度一样时, 岩面高的剖面处地下连续墙水平位移更小, 该两处地下连续墙在每层土方开挖完成时, 最大水平位移值(仅考虑大小, 不考虑方向)及对应深度如表 5 所示。

表 5 各层土方开挖时地连墙最大位移汇总表

开挖深度/m	剖面 3 东侧		剖面 4 西侧	
	地墙最大位移/mm	对应深度/m	地墙最大位移/mm	对应深度/m
1.0	0.7	0	0.6	0
5.3	3.6	6.0	3.2	9.2
8.8	9.9	9.4	9.0	11.8
11.8	13.4	11.4	19.3	13.4
14.7	15.7	13.2	30.8	14.8
17.7	16.7	14.4	40.2	16.4

结合表 5 统计数据, 剖面 3 东侧和剖面 4 西侧地下连续墙水平位移在表层土(1.0 m)、第一层土(5.3 m)及第二层土(8.8 m)开挖期间差距不大, 但从第三层土(11.8 m)开始, 剖面 3 东侧位移增大速率减缓, 而剖面 4 西侧增大速率加快直

至第五层土(17.7 m)开挖时速率才略有减小; 此外, 当开挖深度逐渐接近岩面时, 地下连续墙变形最大值的对应深度相对开挖面逐渐上移, 直至处于开挖面上方。由于剖面 3 东侧建筑物荷载 140 kPa 大于剖面 4 西侧建筑物荷载 100 kPa, 若两者建筑物荷载一致时, 以上影响会更明显。

4.4 地下连续墙厚度对围护变形的影响

对比剖面 1 和剖面 5, 当地下连续墙厚度不一致时, 其水平位移变形趋势类似; 但采用更厚的地下连续墙, 围护变形的总数值会减小, 本工程模拟计算中, 剖面 5 对应 1 000 mm 厚地下连续墙两侧变形最大值为 39.23 mm 和 49.16 mm, 较剖面 1 对应 800 mm 厚地下连续墙变形最大值 63.12 mm 和 63.54 mm, 总体小 1/5 ~ 1/3。

5 计算结果与实测数据对比

工程施工期间, 剖面 1 ~ 5 对应地下连续墙累计最大水平位移统计如表 6 所示。

表 6 实测地下连续墙最大水平位移汇总表

位置	测斜编号	最大水平位移/mm	对应深度/m
剖面 1	ZQT18	-51.94	21.0
	ZQT20	49.19	20.0
剖面 2	ZQT17	-67.04	20.0
	ZQT22	98.93	20.0
剖面 3	ZQT07	-30.49	9.0
	ZQT30	49.03	13.5
剖面 4	ZQT05	-24.95	9.5
	ZQT33	43.59	15.0
剖面 5	ZQT01	26.87	13.5
	ZQT02	-18.32	14.0

对比表 6 实测变形数值和第 4 章节的模拟计算结果, 地下连续墙水平位移最大值受岩面起伏、临近建筑荷载和围护厚度影响的实测变形数值与模拟计算存在类似规律, 在变形的数值大小上却有区别。比如: 剖面 1 和剖面 5 位于基坑端头井处, 端头井结构在开挖期间有更明显的“空间效应”, 导致数值模拟计算值较实测值大了不少, 后续对于类似端头井的结构有限元计算宜采用三维模型; 剖面 2 处在更窄的停车线段, 且首道混凝土支撑为全盖板结构, 现场施工难度大, 各道施

工工序时间长,导致实测变形数值较模拟计算大 30 mm 以上;剖面 3 位于基坑中段,本基坑采用分层放坡开挖,开挖周期长,该处土方开挖时,粉砂粉土中潜水早已流失,基坑内水土荷载减小,导致该处地下连续墙水平位移较计算值增大。

从剖面 1~4 中地下连续墙最大水平位移对应深度可看出:当地下连续墙不入岩时,最大水平位移在坑底一下 1 m 附近,当地下连续墙入岩时,最大水平位移对应深度随岩面抬高也向上移;剖面 5 虽不入岩,但第四道支撑为混凝土支撑,支撑受力周期较钢支撑长,导致该剖面的最大水平位移在第四道支撑下方 1 m 附近。

6 结 论

(1) 采用 plaxis 2D 软件模拟计算的地下连续墙水平变形规律与现场实测值较符合,但变形的具体数值受基坑的“空间效应”、施工周期以及土体含水流失的影响,仍存在差异。

(2) 当基坑周边存在建筑物偏载时,基坑上口有整体向另一侧位移的趋势。

(3) 地下连续墙入岩可通过限制墙趾处水平位移进而减小围护整体变形,最大变形值所处的深度也会上移,且该趋势随岩面抬升效果更明显。

(4) 按照本项目工况条件进行模拟计算,1 000 mm 厚地下连续墙较 800 mm 厚地下连续墙变形总体小 1/5~1/3。

(5) 现场施工期间,各施工工序时间的加长以及基坑内部土体含水长时间流失,会加大地下连续墙变形。

(6) 地铁车站基坑端头井受“空间效应”影响,采用平面模型计算得出的结果会偏大,对于此处节点宜采用三维模型进行计算。

参考文献:

- [1] 董会民,郭利刚,郭士朋. 软土地区地铁基坑围护结构变形控制思考[J]. 建筑安全,2021,36(3):29-34.
- [2] 于洋,牛少卿,杨双锁,等. 基于 FLAC3D 的太原车站

基坑变形影响因素研究[J]. 施工技术,2016,45(13):93-96.

- [3] 顾祯雪,楼伟中,程钰博,等. 南京软土地区超长异形深基坑地连墙变形性状分析[J]. 现代隧道技术,2021,58(1):182-189.
- [4] 曾晓云. 基于地下连续墙变形规律的数值分析研究[J]. 施工技术,2015,44(13):15-18.
- [5] 孙武斌. 地铁车站偏压基坑围护结构变形影响因素研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2020,39(4):86-91.
- [6] 徐焯,冯仁麟,吴跃华. 地铁车站偏载深基坑围护结构设计分析[J]. 城市轨道交通研究,2012,15(9):43-48.
- [7] 戈铭,贺智江,丁建文. 长江漫滩非对称荷载下基坑围护结构变形特性研究[J]. 施工技术,2021,50(7):21-25.
- [8] 孙九春,白廷辉. 软土地铁深基坑开挖过程中围护侧向变形控制方法研究[J]. 隧道建设(中英文),2019,39(增刊2):308-317.
- [9] 刘小丽,马悦,郭冠群,等. PLAXIS2D 模拟计算基坑开挖工程的适用性分析[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版),2012,42(4):19-25.
- [10] 蒋宏鸣,张海波,徐壮涛,等. 临近既有建筑深基坑开挖简化分析方法选取研究[J]. 建筑结构,2020,50(增刊1):995-999.
- [11] 姚远. 基于 PLAXIS 的基坑开挖模拟研究[J]. 低温建筑技术,2019,41(6):93-95;109.
- [12] 曹丙柄,朱金贤,陈彬. 软土地区某地铁车站深基坑施工监测分析[J]. 工程建设,2022,54(12):72-78.
- [13] 孙根强. 天津软土高铁深基坑地下连续墙尺寸对水平侧移量及地表沉降量的影响[J]. 市政技术,2024,42(12):206-213;222.
- [14] 徐洪钟,崔文森,胡文杰. 南京地区地铁车站深基坑变形性状分析[J]. 防灾减灾工程学报,2018,38(4):599-607.
- [15] 武进广. 粉砂土深基坑支护结构受力变形特性分析[J]. 铁道工程学报,2013,30(5):91-96.
- [16] 刘方克,赵海梨,张广亮. 土岩组合地层地铁基坑围护结构变形规律分析[J]. 施工技术,2016,45(增刊2):149-153.