

DOI: 10.7672/sgjs2025150083

富水砂卵石地层双基坑开挖引起的邻近既有 车站变形规律分析*

张利平^{1,2},王大梁^{1,2},张颀隽^{1,2},简兴超^{1,2},吴俊^{1,2},张加兵³

(1. 中建三局基础设施建设投资有限公司,湖北 武汉 430073; 2. 中建三局集团有限公司,
湖北 武汉 430064; 3. 广西大学土木建筑工程学院,广西 南宁 530004)

[摘要] 为研究富水砂卵石地层城市地铁车站双基坑施工对邻近既有车站变形的影响,依托成都地铁27号线韦家碾站邻近地铁1号线既有车站施工实践,基于现场实测数据分析既有车站侧墙水平位移、纵向位移和竖向位移,采用数值模拟结果与现场实测数据相互验证,分析双基坑施工引起的邻近既有车站变形规律,并探讨钢支撑间距对邻近既有车站变形的影响。研究表明,由于既有地铁车站结构刚度大,基坑开挖后车站上方地表发生隆起变形;双基坑开挖时土体卸荷使既有车站隆起,尤其是换乘通道基坑施工时隆起效果更明显;适当减小钢支撑间距可有效控制既有车站变形,当钢支撑间距取3~3.5m时,既有车站变形控制效果最佳,经济效益最好。

[关键词] 地铁车站;富水地层;基坑;变形;监测;数值模拟

[中图分类号] U231

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)15-0083-07

Analysis of Deformation Characteristic in Adjacent Existing Station Induced by Twin Foundation Excavation Construction in Water-rich Sandy Cobble Stratum

ZHANG Liping^{1,2}, WANG Daliang^{1,2}, ZHANG Qijun^{1,2}, JIAN Xingchao^{1,2},
WU Jun^{1,2}, ZHANG Jiabing³

(1. CCTEB Infrastructure Construction Investment Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430073, China;

2. China Construction Third Engineering Bureau Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430064, China;

3. School of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China)

Abstract: Based on the construction practice of Weijianian Station on Chengdu Subway Line 27 adjacent to the existing Line 1 station, this study investigates the influence of twin foundation excavation construction for urban subway stations in water-rich sandy cobble strata on the deformation of adjacent existing stations. Field monitoring data were analyzed to assess the longitudinal, lateral and vertical displacements of the sidewalls of the existing station. Numerical simulation results and field measurements were mutually validated to analyze the deformation patterns of the adjacent existing station induced by twin foundation excavation construction. The influence of steel support spacing on the deformation of the adjacent existing station was also explored. The research results show that due to the high structural stiffness of the existing subway station, the ground surface above the station exhibits uplift deformation after foundation excavation construction. Soil unloading during twin foundation excavation construction causes the existing station to uplift, with this effect being more pronounced during the construction of the transfer channel foundation excavation immediately adjacent to the existing station. Appropriately reducing the steel support spacing can effectively control the deformation of the existing station. When the

* 国家自然科学基金(52108367)

[作者简介] 张利平,工程师,E-mail:493212179@qq.com

[通信作者] 张加兵,博士,副教授,E-mail:zhang.j.b@gxu.edu.cn

[收稿日期] 2025-04-15

steel support spacing is set at 3~3.5m, deformation control achieves optimal effectiveness with the best economic efficiency.

Keywords: subway stations; water-rich strata; foundation excavation; deformation; monitoring; simulation

0 引言

随着我国城市现代化轨道交通的快速发展,近接施工已成为城市轨道交通建设中须考虑的关键风险点。新建城市地铁车站基坑施工会诱发邻近既有车站产生较大变形,影响既有车站正常使用^[1]。因此,在基坑开挖过程中须减小对邻近既有建(构)筑物及周边环境的影响。

已有学者针对复杂条件下基坑变形规律和基坑近接施工对既有车站的影响展开了研究。冯春蕾等^[1]对18个地铁车站基坑变形规律进行统计,得出砂卵石地层中狭长基坑整体变形规律,提出以内支撑施加预应力为主的地铁车站基坑变形控制技术。刘季富^[2]针对成都富水砂卵石地层,对地铁车站深基坑变形与围护结构受力进行分析。慕焕东等^[3]通过小比尺模型试验对车站基坑支护结构变形特性进行研究,得到深基坑支护结构变形规律。王小波等^[4]针对紧邻既有铁路隧道某人防基坑工程,采用桩锚支护、土压平衡开挖、土工格栅回填等方法进行基坑支护设计,并利用隧道和基坑变形监测数据分析了基坑开挖、回填对既有铁路隧道和支护结构变形的影响。王立新等^[5]采用数值模拟手段研究深基坑开挖对邻近地铁车站的影响,结果表明既有车站最大竖向和侧向位移位于车站中部,侧墙水平位移曲线为典型的内凸形。翁志坚^[6]依托福州北站南广场某深基坑工程,采用现场实测与数值模拟相结合的方法,对基坑和既有车站变形进行分析,发现紧接既有车站一侧的基坑围护结构水平变形相对于其他侧小50%~70%。胡瑞青等^[7]研究基坑开挖时支护结构力学响应特征,分析基坑施工对地铁隧道和既有车站的影响。张榜武^[8]基于上海某紧邻既有车站深基坑工程,提出了低净空超深地下连续墙施工技术、紧邻既有车站基坑变形控制技术和复杂承压含水层抽水影响控制技术,有效确保了施工安全。马凯伦等^[9]依托深圳市某基坑工程,采用数值模拟手段分析得到基坑降水时既有车站变形以水平位移为主,开挖时以竖向位移为主的结论。张炳焜等^[10]依托成都地铁18号线某车站基坑,研究超深基坑在不同施工环境中的开挖变形规律,并根据围护结构变形及地表沉降判断基坑施工稳定性及安全性。朱斌^[11]通过对现场实测数据和数值模拟结果对比分析,得到基坑开挖及区间暗挖

下既有车站变形规律。王志杰等^[12]结合板壳理论、现场监测及数值分析,对基坑开挖后土体卸载引起的力学响应特征进行研究,得出基坑开挖对既有车站变形规律的影响。刘军涛^[13]为研究大跨度盖挖逆作地铁车站主体结构施工动力响应,采用数值模拟计算方法分析水平位移、竖向位移和剪应力变化规律,并给出基坑开挖和主体结构施工优化措施。上述研究中,多针对单基坑邻近既有车站工程进行研究,而对双基坑开挖对邻近既有车站的研究较少。因此,本文依托成都地铁27号线韦家碾站邻近地铁1号线既有车站施工实践,将数值模拟结果与现场实测数据相互验证,分析双基坑施工诱发邻近既有车站变形规律,并探讨钢支撑间距对邻近既有车站变形的影响。

1 工程概况

1.1 项目概况

成都地铁27号线韦家碾站位于北三环路,既有车站为运营地铁1号线韦家碾站,属于地下2层岛式车站,主体结构形式为地下2层双柱框架结构,站台宽度14m,标准段宽度22.7m,地面标高约512.450m。新建地铁27号线韦家碾站车站主体基坑长度245.54m,开挖深度17.83~20.78m。换乘通道位于地铁1号线与地铁27号线韦家碾站主体之间,基坑长度239.49m,宽度6.2~20.6m,开挖深度10.55~12.80m。开挖车站主体基坑与换乘通道基坑施工时采用围护桩+内支撑支护形式。

1.2 工程地质与水文地质条件

车站场地范围内上覆第四系全新统人工填土,其下为第四系上更新统冲洪积层黏土、粉质黏土、黏质粉土、细砂、中砂及卵石,下伏基岩为白垩系上统灌口组泥岩,岩土层物理力学参数如表1所示。车站施工范围内无地表河流,地下水类型主要为上层滞水、砂卵石孔隙型潜水、黏土裂隙水及基岩裂隙水。

2 基坑施工方案

车站结构基坑施工过程主要分为车站主体基坑开挖、换乘通道基坑开挖,即首先开挖车站主体基坑,然后开挖换乘通道基坑至既有车站结构外墙,以既有车站一侧作为换乘通道基坑部分围护结构,施工方案如表2所示。

表 1 岩土层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of geotechnical strata

岩土层	重度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	压缩模量/MPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/($^\circ$)	泊松比	渗透系数/($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)	孔隙率	厚度/m
杂填土	18.0	2.0	5	10.0	0.34	2.000	0.70	2
黏土	19.8	8.0	35	14.0	0.26	0.005	0.41	5
粉质黏土	19.5	6.0	20	16.0	0.29	0.050	0.43	3
黏质粉土	19.3	5.5	15	17.0	0.30	0.150	0.48	2
细砂	18.5	5.0	0	20.0	0.28	3.000	0.60	1
中砂	19.0	5.5	0	22.0	0.26	10.000	0.70	1
松散卵石	20.0	23.0	0	25.0	0.25	18.000	0.90	2
稍密卵石	21.0	26.0	0	33.0	0.23	18.000	0.80	2
中密卵石	22.0	35.0	0	36.0	0.20	18.000	0.65	3
密实卵石	23.0	46.0	0	43.0	0.17	18.000	0.55	5
全风化泥岩	21.0	6.5	36	16.5	0.29	0.400	0.42	2
强风化泥岩	22.0	21.0	50	25.0	0.26	0.400	0.35	5
中风化泥岩	23.0	200.0	350	35.0	0.13	0.400	0.30	—

表 2 基坑施工方案

Table 2 Construction scheme of the foundation excavation

施工工序	施工内容
1	车站主体基坑围护结构施工
2	车站主体基坑降水
3	车站主体基坑第 1 次开挖至地下 2.5m 处,在距地面约 2m 处设置第 1 道内支撑
4	车站主体基坑第 2 次开挖至地下 8m 处,在距地面约 7.5m 处设置第 2 道内支撑
5	车站主体基坑第 3 次开挖至地下 13.5m 处,在距地面约 13m 处设置第 3 道内支撑
6	车站主体基坑第 4 次开挖至底部,距地面约 20m,并浇筑底板
7	车站主体基坑拆撑回筑
8	换乘通道基坑围护结构施工
9	换乘通道基坑开挖至地下 4.5m 处,在距地面约 4m 处设置第 1 道内支撑
10	换乘通道基坑开挖至底部,距地面约 10m,并浇筑底板

3 测点布置

基坑开挖过程中,土体卸荷引起邻近既有车站隆起变形,进而影响既有车站正常运行。本文对基坑开挖过程中地表竖向位移、围护桩位移和既有车站侧墙位移进行监测,测点布置如图 1 所示。

4 监测结果分析

4.1 围护桩位移

车站主体基坑和换乘通道基坑开挖后围护桩水平位移如图 2 所示。由图 2 可知,车站主体基坑开挖完成后,围护桩深层水平位移大致呈“弓”字

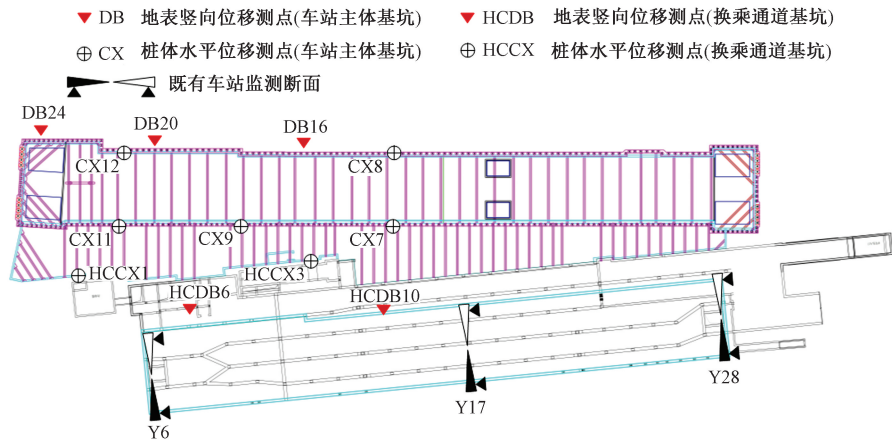


图 1 测点平面布置

Fig. 1 Layout plan of monitoring points

形变化,桩体水平位移随深度增加基本呈先增加后减小的变化趋势,且靠近既有车站处桩体水平位移相对小于远离既有车站处。换乘通道基坑开挖完成后,靠近既有车站处桩体水平位移小于远离既有车站处,这是由于当基坑开挖时土体卸荷,土体会趋向于基坑内变形,而由于既有车站的存在,使土体变形路径受阻。车站主体基坑及换乘通道基坑围护桩最大水平位移分别位于距桩顶约 14,5m 处。

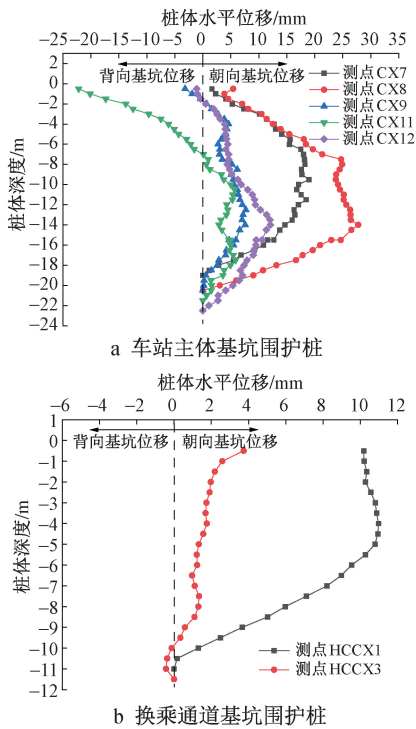


图 2 围护桩水平位移

Fig. 2 Horizontal displacement of retaining piles

4.2 既有车站侧墙位移

车站主体基坑和换乘通道基坑开挖过程中既有车站近基坑侧侧墙位移如图 3 所示,其中,水平位移正值表示向北位移、负值表示向南位移,纵向位移正值表示向东位移(背向基坑)、负值表示向西位移(朝向基坑),竖向位移正值表示隆起、负值表示沉降。由图 3 可知,车站主体基坑开挖完成后既有车站侧墙水平和竖向位移均小于换乘通道基坑开挖完成后,这说明换乘通道基坑开挖对既有车站水平和竖向位移的影响更显著;既有车站侧墙水平位移北端(监测断面 Y28)最大、中间部分(监测断面 Y17)次之、南端(监测断面 Y6)最小。既有车站侧墙纵向位移及竖向位移最大值均位于中间段,地铁车站是大刚度结构,其存在使土体向基坑变形路径被隔断,从而使地下既有车站背向倾斜,导致地铁车站向基坑侧位移并向上抬

升。同时,位于地下的地铁车站与其周边土体发生剪切作用,也带动了周边土体向上变形,导致地铁车站整体上抬。

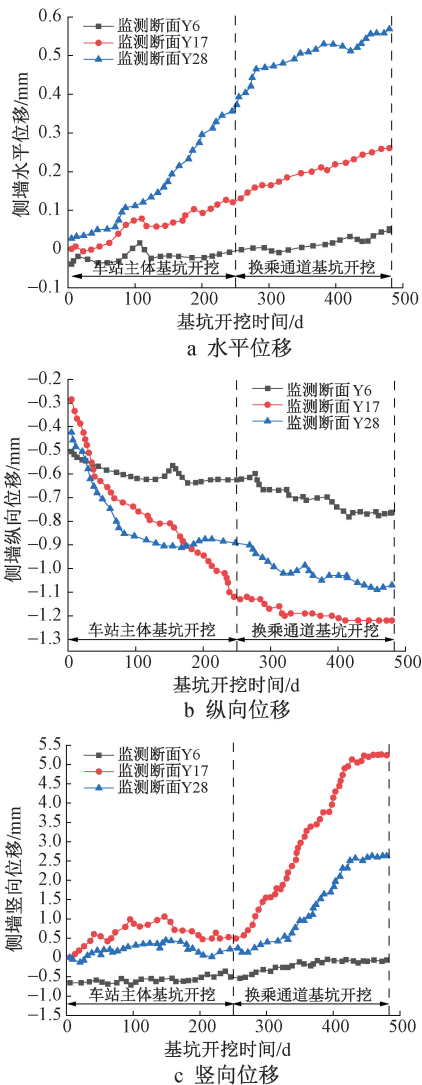


图 3 既有车站侧墙位移

Fig. 3 Displacement of sidewalls in existing station

5 数值模拟分析

5.1 数值模型建立与材料参数选取

采用 FLAC 3D 有限差分软件分析新建地铁车站主体基坑及换乘通道基坑开挖对既有地铁车站的影响,数值模型尺寸范围以开挖部分为中心,边界距离取基坑开挖深度的 3~5 倍,即模型长 400m、宽 170m,既有地铁车站顶部埋深约 4m,车站主体基坑开挖深度约 20m,换乘通道基坑开挖深度 10.55~12.80m,因此模型高度取 70m,如图 4 所示。为提高计算效率并准确模拟实际工况,对基坑区域网格进行加密,共划分 300 887 个单元、203 865 个结点,计算时假定土体为连续介质,土体、围护桩及既有车站采用实体单元模拟,内支撑采用梁单元模拟,

土体本构模型采用莫尔-库仑本构模型,地铁车站及围护结构采用线弹性本构模型模拟。

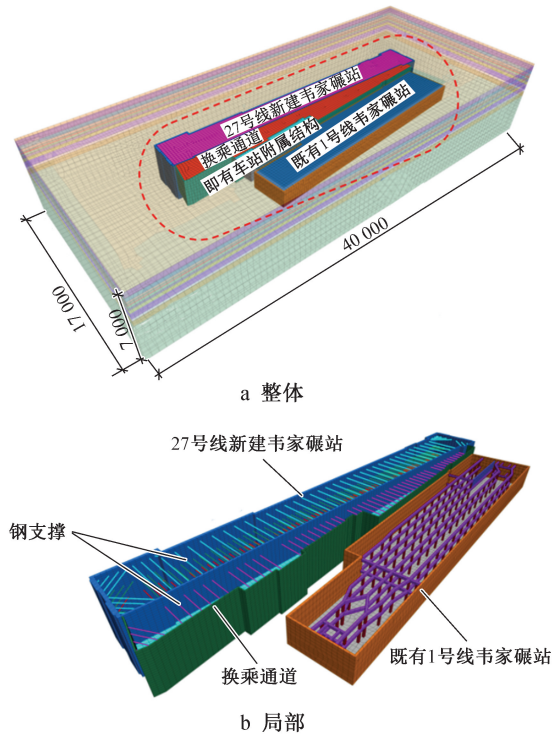


图4 三维数值计算模型

Fig. 4 Three-dimensional numerical calculation model

根据地质勘察报告及工程经验,对土层计算参数进行综合取值,如表1所示。车站结构采用C35钢筋混凝土模拟,钻孔灌注桩采用C30钢筋混凝土模拟,参数取值如表3所示。为方便进行数值模拟计算,将围护桩等效为地下连续墙。

表3 支护结构及既有车站材料参数

Table 3 Material parameters of supporting structure and existing station

结构类型	重度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/MPa	泊松比
钻孔灌注桩	23.85	3.00×10^4	0.20
既有车站	23.90	3.15×10^4	0.20
混凝土支撑	23.00	3.00×10^4	0.20
钢管支撑	—	21.00×10^4	0.18

5.2 数值模拟方案

本工程支护结构形式为单排钻孔灌注桩,其中新建地铁车站基坑围护桩桩径为1 000mm,桩间距为1 000mm,换乘通道基坑围护桩桩径为800mm,桩间距为700mm。计算得到2处基坑等效后的地下连续墙厚度分别约为670,540mm。数值计算时在桩体和土体间施加接触面,用来模拟桩体与土体间的相互作用。

计算模型四周边界采用法向约束,底面采用固定约束,顶面自由,初始应力场仅考虑自重应力。

根据现场实际情况,该路段为市区繁华道路,车流量和人流较大,模拟过程中在既有车站上方路面适当施加30kPa附加竖向荷载。此外,既有地铁车站处于运营状态,列车经过车轨会产生附加荷载,为方便研究,假定列车荷载为静荷载,认为其均匀分布在轨道上,根据GB 50157—2013《地铁设计规范》,一般列车轴重140kN,可视为在列车轨道上施加40kN/m的均布荷载。模拟施工工况严格按照现场施工方案进行,如表2所示。

5.3 计算结果分析

5.3.1 地表竖向位移

对地表竖向位移监测结果与数值模拟结果进行对比,如图5所示。由图5可知,地表竖向位移监测结果与计算结果吻合较好,其中最大位移及其出现位置接近,这表明数值计算模型和所选计算参数较合适,可较好地反映工程实际情况。车站主体基坑开挖后,地表竖向位移呈“凹槽形”分布,且最大竖向位移所处位置符合工程实际情况。换乘通道基坑开挖后部分测点对应的地表竖向位移不是常规的“凹槽形”分布,存在向上隆起变形,测点HCDB10表现更显著。这是由于该测点位于既有车站上方,换乘通道基坑开挖后由于既有车站结构的向上抬升,导致该部位土体向上隆起。

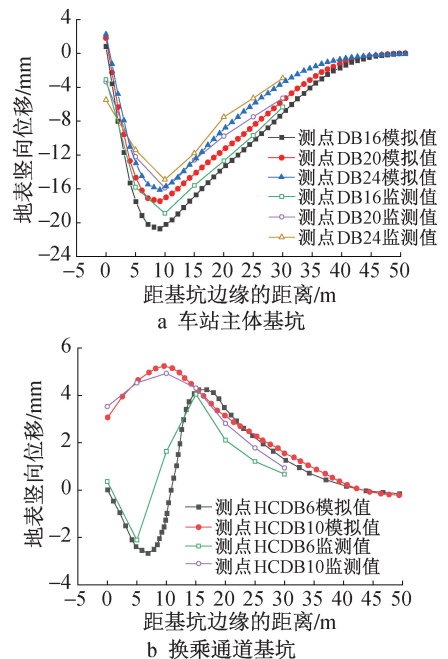


图5 地表竖向位移监测结果与数值模拟结果对比
Fig. 5 Comparison of ground vertical displacement monitoring results with numerical simulation results

5.3.2 既有车站位移

为分析基坑开挖对既有车站的影响,对既有车

站下行线轨行区隧道底板道床竖向位移进行分析,如图6所示。由图6可知,既有车站隧道底板道床竖向位移监测值与模拟值变化趋势相似,数值相近,主要表现为向上隆起。进行车站主体基坑开挖时道床隆起较小,进行换乘通道基坑开挖时道床隆起快速增大。

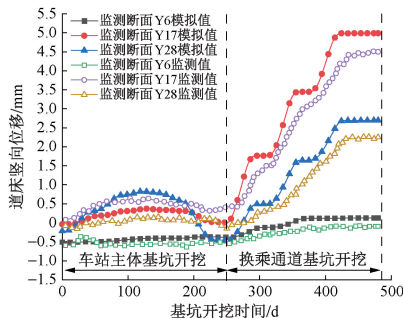


图6 既有车站隧道底板道床竖向位移监测结果与数值模拟结果对比

Fig. 6 Comparison of trackbed vertical displacement monitoring results and numerical simulation results for existing station tunnel slab

由于监测断面 Y17 处既有车站竖向位移较大,因此选取该断面既有车站侧墙水平位移进行分析,如图7所示。由图7可知,既有车站侧墙底部水平位移大于顶部,车站主体基坑开挖及回筑完成后既有车站侧墙水平位移较小,随着换乘通道基坑开挖,由于既有车站邻近基坑,此时既有车站侧墙水平位移快速增大,进而说明换乘通道基坑开挖对既有车站的影响大于车站主体基坑开挖。

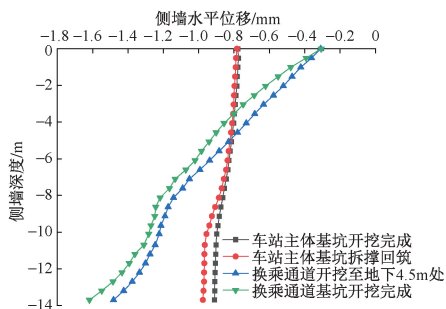


图7 监测断面 Y17 处既有车站侧墙水平位移

Fig. 7 Horizontal displacement of existing station sidewall at monitoring section Y17

6 不同钢支撑间距下既有车站变形规律

基坑开挖后土体卸荷,基坑周围土体向坑内位移,既有车站位移与基坑围护结构位移密切关联。所以控制围护结构水平位移至关重要,基坑内钢支撑合理施作对控制基坑及既有车站变形起到重要作用。通过分析钢支撑间距对既有车站的影响,进一步探讨既有车站变形规律。由前文可知换乘通

道基坑开挖对既有车站的影响更显著,所以选取换乘通道基坑钢支撑间距进行分析。同时,选取监测断面 Y17 处既有车站侧墙水平位移进行分析,以得到最优钢支撑间距。

换乘通道基坑竖向设置 1 道钢支撑,以钢支撑间距 4m 为基准,以 0.5m 为间隔,共设置 5 个工况,即钢支撑间距分别为 2, 2.5, 3, 3.5, 4m, 对应的监测断面 Y17 处既有车站侧墙水平位移如图 8 所示。由图 8 可知,既有车站侧墙深度较大时,水平位移随着钢支撑间距的减小而减小。随着钢支撑间距的减小,侧墙顶部水平位移由 -0.32mm 变为 0.39mm ,即侧墙顶部由朝向基坑位移变为远离基坑位移,而侧墙底部水平位移由 -1.62mm 变为 -0.68mm ,侧墙水平位移明显减小。此外,当钢支撑间距由 3m 减至 2m 时,钢支撑间距对减小既有车站侧墙水平位移的效果逐渐减弱。钢支撑间距由 4m 减至 2m 时,侧墙最大水平位移分别减小了 28.3%, 43.9%, 53.3%, 57.7%。因此,在考虑施工经济性和保护邻近既有地铁车站等综合因素下,换乘通道基坑施工时钢支撑间距可适当减小,宜为 3~3.5m。

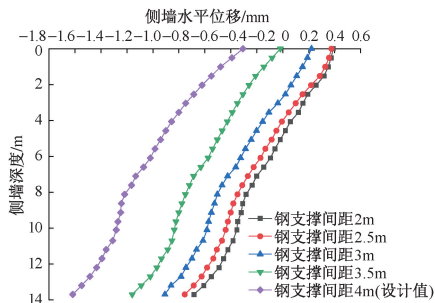


图8 不同钢支撑间距下既有车站侧墙水平位移

Fig. 8 Horizontal displacement of existing station sidewall under different steel support spacing

7 结语

依托成都地铁 27 号线邻近地铁 1 号线既有车站施工工程实际,结合现场监测和数值模拟,分析了同侧双基坑施工时既有车站变形影响规律,并进一步探讨了不同钢支撑间距下换乘通道基坑施工对邻近既有车站的影响,得出钢支撑间距优化建议,并得出以下主要结论。

1) 既有地铁车站的存在会改变地表竖向位移趋势,因车站刚度较土体大,导致基坑开挖后土体变形路径被隔断,使地下既有车站向上抬升,既有车站上方地表向上隆起。

2) 基坑开挖时土体卸荷效应使近基坑侧地下既有地铁车站向上抬升,邻近基坑的车站竖向位移变化具有明显的阶段性,主要受基坑施工阶段和开

挖工序的影响。此外,基坑距地下既有车站越近,其施工对车站的影响越大。

3)减小钢支撑间距能够降低地下既有车站变形,车站侧墙深度较大时,水平位移随着钢支撑间距的减小而减小,当钢支撑间距减至3m后,水平位移减小效果开始减弱。因此,综合考虑经济效益和安全性,钢支撑间距宜取3~3.5m,此时可保证基坑施工和既有车站安全。

参考文献:

- [1] 冯春蕾,张顶立.砂卵石地区地铁车站基坑整体变形模式及其应用[J].岩石力学与工程学报,2018,37(S2):4395-4405.
FENG C L,ZHANG D L. The general deformation mode and its application of subway station foundation pit in sandy cobble stratum[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2018,37(S2):4395-4405.
- [2] 刘季富.富水砂卵石地层大型地铁车站基坑变形与支护结构受力分析[J].城市轨道交通研究,2022,25(6):43-46,52.
LIU J F. Foundation pit deformation and supporting structure stress analysis of large metro station in water-rich sandy cobble stratum[J]. Urban mass transit,2022,25(6):43-46,52.
- [3] 慕焕东,邓亚虹,张文栋,等.洛阳地铁车站基坑支护变形特性模型试验研究[J].岩土工程学报,2021,43(S1):198-203.
MU H D,DENG Y H,ZHANG W D,et al. Model test study on deformation characteristics of foundation pit support in Luoyang subway station[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2021,43(S1):198-203.
- [4] 王小波,章良兵,王笃礼.紧邻隧道的大型基坑变形控制设计[J].施工技术(中英文),2023,52(1):114-118.
WANG X B,ZHANG L B,WANG D L. Deformation control design of large foundation excavation adjacent to tunnel[J]. Construction technology,2023,52(1):114-118.
- [5] 王立新,王强,李炳龙,等.基坑卸载对临近地铁车站影响的数值模拟研究[J].西安理工大学学报,2022,38(4):577-587,602.
WANG L X,WANG Q,LI B L,et al. Numerical simulation study on influence of foundation pit unloading near adjacent subway station[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2022,38(4):577-587,602.
- [6] 翁志坚.深基坑施工对临近既有车站结构变形的影响[J].中国科技论文,2021,16(10):1055-1060,1067.
WENG Z J. Influence of deep foundation pit construction on deformation of adjacent subway station[J]. China sciencepaper, 2021,16(10):1055-1060,1067.
- [7] 胡瑞青,戴志仁,李储军,等.砂卵石地层基坑开挖对侧方地铁交叉隧道和车站的影响分析[J].铁道标准设计,2018,62(12):118-124.
HU R Q,DAI Z R,LI C J,et al. Analysis of influence of foundation pit in sandy cobble stratum on side metro crossing tunnel and station[J]. Railway standard design,2018,62(12):118-124.
- [8] 张榜武.软土地区紧邻既有地铁车站深基坑施工安全技术[J].施工技术(中英文),2024,53(18):125-128.
ZHANG B W. Construction safety technology of deep foundation excavation adjacent to existing subway station in soft soil area[J]. Construction technology,2024,53(18):125-128.
- [9] 马凯伦,董明礼,曹义,等.两侧双基坑开挖对密贴地铁车站的影响研究[J].地下空间与工程学报,2022,18(S2):1043-1048.
MA K L,DONG M L,CAO Y,et al. Study on the influence of double foundation pits excavation on closely-attached subway station[J]. Chinese journal of underground space and engineering,2022,18(S2):1043-1048.
- [10] 张炳焜,马耀先,李雪.超深基坑施工对既有地铁车站变形的控制研究[J].施工技术(中英文),2024,53(3):1-5,20.
ZHANG B K,MA Y X,LI X. Research on deformation control of existing subway stations during ultra-deep foundation excavation construction[J]. Construction technology,2024,53(3):1-5,20.
- [11] 朱斌.换乘车站基坑开挖及区间暗挖下穿施工对既有地铁站的变形控制及影响分析[J].城市轨道交通研究,2023,26(3):176-180.
ZHU B. Deformation control and influence analysis of interchange station foundation pit excavation and interval covered underpassing excavation on existing metro station[J]. Urban mass transit,2023,26(3):176-180.
- [12] 王志杰,周飞聪,周平,等.基于强近接大型基坑单侧开挖卸载既有车站变形理论研究[J].岩石力学与工程学报,2020,39(10):2131-2147.
WANG Z J,ZHOU F C,ZHOU P,et al. Research on deformation theory of existing stations based on single side excavation and unloading of large foundation pits with strong close connection[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering,2020,39(10):2131-2147.
- [13] 刘军涛.大跨度地铁车站主体结构施工动力响应与优化措施研究[J].施工技术(中英文),2025,54(3):101-107.
LIU J T. Research on dynamic response and optimization measure of the main structure construction of large span subway station[J]. Construction technology,2025,54(3):101-107.