

深基坑十字交叉换乘既有地铁车站变形特性分析

刘美麟,侯艳娟,张顶立,房 倩

(北京交通大学 城市地下工程教育部重点实验室,北京 100044)

摘 要:基于新建天津地铁 5 号线与既有地铁 1 号线十字换乘车站——下瓦房站的现场实测数据,研究深基坑开挖与既有车站十字相交时,基坑围护结构、墙后地表和既有车站的变形规律.研究表明:围护结构最大水平位移约 $0.064\% H$ (H 为基坑开挖深度),位于地表下约 $0.63H$.墙后地表最大沉降约 $0.025\% H$,位于墙后约 $0.71H$,沉降槽影响范围约为 $2H$.墙后地表最大沉降与围护结构最大水平位移的比值介于 $0.38\sim 1.04$ 之间,平均约为 0.77 .与基坑开挖方向交叉的既有地铁车站竖向上浮,水平方向外凸,以水平变形为主.既有车站周围止水加固和加固墙后软弱土层可显著减小既有结构变形.

关键词:基坑开挖;既有车站;地表沉降;变形规律

中图分类号:U231.3 **文献标志码:**A

Deformation analysis of deep foundation pit across the existing subway station

LIU Meilin, HOU Yanjuan, ZHANG Dingli, FANG Qian

(Key Laboratory for Urban Underground Engineering, Ministry of Education
Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Based on the research data collected at Xiawafang station, which is a cross-transfer subway station of Tianjin subway line 5 and line 1, the horizontal displacement of foundation pit support structure, the surface settlement behind the retaining wall, and the deformation of existing station caused by deep foundation pit crossing the existing subway station are analyzed. The results show that the maximum horizontal displacement of support wall is $0.064\% H$ (in which H is the excavation depth), where is about $0.63H$ under the ground surface. The maximum ground surface settlement behind the retaining wall is $0.025\% H$, where is about $0.71H$ away from the wall. The influence zone extends to about $2H$ from the wall. The ratio between the maximum ground surface settlement and the maximum wall deflection is among 0.38 to 1.04 , and its average value is about 0.77 . The vertical deformation of the existing station which crosses the foundation pit is mostly uplifted. The horizontal displacement protrudes outside the railway station. The deformation of the existing station is mainly horizontal. By reinforcing the existing sta-

收稿日期:2017-02-24
基金项目:国家自然科学基金(51738002);中央高校基本科研业务费专项资金(2017JBZ201)
Foundation items: National Natural Science Foundation of China (51738002); Fundamental Research Funds for the Central Universities (2017JBZ201)
第一作者:刘美麟(1990—),女,山西吕梁人,博士生.研究方向为基坑工程.email:14115302@bjtu.edu.cn.
引用格式:刘美麟,侯艳娟,张顶立,等.深基坑十字交叉换乘既有地铁车站变形特性分析[J].北京交通大学学报,2017,41(6):122—129.
LIU Meilin, HOU Yanjuan, ZHANG Dingli, et al. Deformation analysis of deep foundation pit across the existing subway station[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2017, 41(6): 122—129. (in Chinese)

tion with waterproofing sealing and reinforcing its soft soil layer behind the retaining wall, the existing structural deformation can be significantly reduced.

Keywords: excavation of foundation pit; existing station; ground surface settlement; deformation law

随着城市化建设的发展,地铁网络日趋完善,城市地下工程施工环境日趋复杂^[1-3].地铁车站深基坑作为地下工程的主要组成部分,其变形与稳定性一直是研究重点,当深基坑邻近既有建(构)筑物时,其变形特征将更为复杂.学者们在深基坑与既有车站平行施工时的变形特性方面取得了丰富的研究成果.曾远等^[4]通过数值模拟方法,研究了临近基坑的既有车站变形,以及影响运营车站变形的主要施工参数;高盟等^[5]指出,在车站开挖侧设置托换桩、旋喷桩及搅拌桩进行加固和分块开挖是控制车站变形的有效措施;刘燕等^[6]讨论了既有地下结构对基坑位移的遮拦效应.陈树林等^[7]对紧邻既有结构的深基坑受力和变形特性进行了计算分析.而关于基坑与既有结构换乘情况下的结构变形特性研究则相对较少.伍尚勇等^[8]分析了双侧深基坑施工对紧邻地铁隧道变形的影响,但由于隧道的刚度比地铁车站小很多,其结果不适用于深基坑与既有车站换乘下地铁车站变形规律分析.同时,现有研究将既有车站受基坑开挖产生的力学响应^[9-12]与既有车站对围护结构和墙后地表的影响研究^[13-15]分开讨论,而未考虑二者的联系.

本文作者以天津地铁 5 号线下瓦房站与既有 1 号线车站十字换乘的基坑工程为研究背景,对密贴运营既有地铁车站的基坑施工全过程进行分析,通过实测数据统计研究基坑围护结构、墙后地表和既有 1 号线车站的变形特性,并分析三者的联系和区别,对类似工程提供参考.

1 工程概况

新建地铁 5 号线下瓦房站基坑位于天津市河西区大沽南路与奉化道交叉口,主基坑分东西两侧对称开挖,明挖顺做法施工,车站主体为地下三层岛式站台车站,全线位于直线上,全长 154.4 m,西侧长 62.1 m,预留换乘节点长 22.0 m,东侧长 70.3 m,标准段和端头井结构净宽分别为 22.3 m 和 26.2 m,最大开挖深度分别为 23.2 m 和 24.8 m.与既有 1 号线下瓦房地铁车站夹角 83°,取既有车站和基坑的一半为研究对象,基坑与既有车站平面位置及测点布置如图 1 所示.

图 2 为基坑标准段支撑及地质剖面图(对应图 1

中剖面 1-1),基坑围护结构采用厚度为 1.0 m 的地下连续墙,标准段和端头井段地连墙埋深分别为 43.0 m 和 52.3 m,插入比分别为 0.54 和 0.47,墙趾位于⑩₃粉质黏土层中.施工影响范围内土层主要为粉质黏土、黏土、粉土及粉砂,土质松软,围岩分级为 VI 级.地下水埋深在地表下 1.0 m,每次开挖都将地下水降至开挖面以下 0.5~1.0 m.Liu 等^[16]研究表明,地下水位变化对地层和围护结构变形影响很小,尤其是黏性土为主的地区,可忽略降水对变形的影响.

地表沉降监测采用 Leica NA2 精密水准仪,配套钢钢尺,围护结构水平侧移监测采用 Leica TC1201 全站仪、测斜仪和测斜管等,测点读数偏差不超过 0.3 mm,分析从基坑开始开挖到底板浇筑完成各结构物的变形规律,初始位移归零.根据距既有车站距离远近选取 3 个监测断面为研究对象,如图 1 中的 DBC-07~DBC-09 所示,监测断面间距为 20 m,37 地表沉降测点 01~05 距基坑围护墙的距离依次为 2 m、7 m、17 m、32 m 和 52 m.

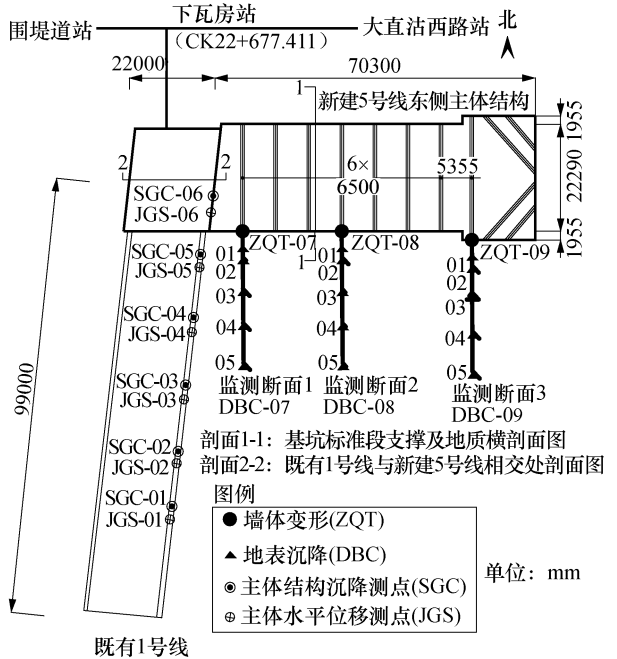


图 1 基坑与既有车站平面位置及测点布置

Fig.1 Plane positions of foundation pit and the existing station and the arrangement of monitoring points

既有地铁 1 号线下瓦房站与新建地铁 5 号线车站十字相交换乘,为双层钢筋混凝土框架结构,主体车站结构不存在沉降缝,基坑施工过程中 1 号线

正常运营.1 号线车站长 198.0 m,宽 19.3 m,车站埋深 23.55 m,覆土厚度 2.8 m,地连墙墙趾标高-35.4 m,位于⑩₃ 粉质黏土层.换乘处共用 1 号线站厅层、站台层,并预留 6 号线站台层,换乘处 1 号线剖面图如图 3 所示(图 1 中剖面 2-2).

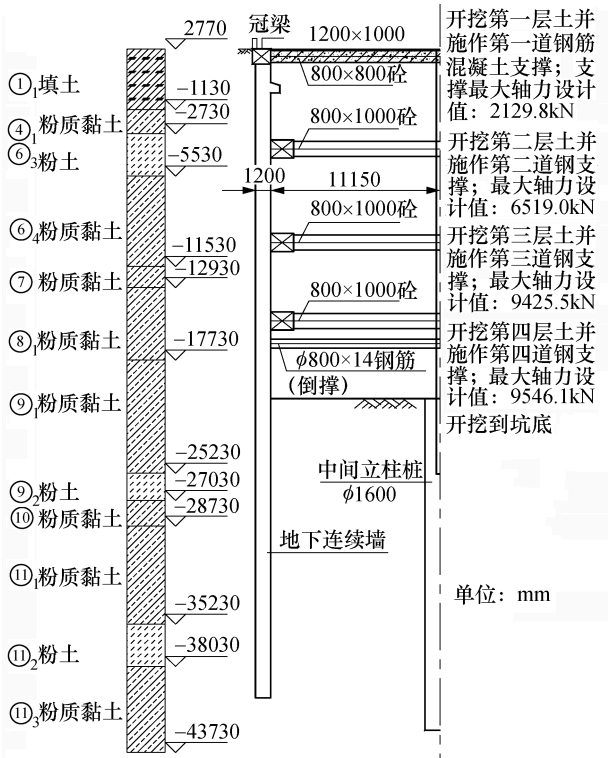


图 2 基坑标准段支撑及地质剖面图

Fig.2 Inner support and geological profile of standard section of foundation pit

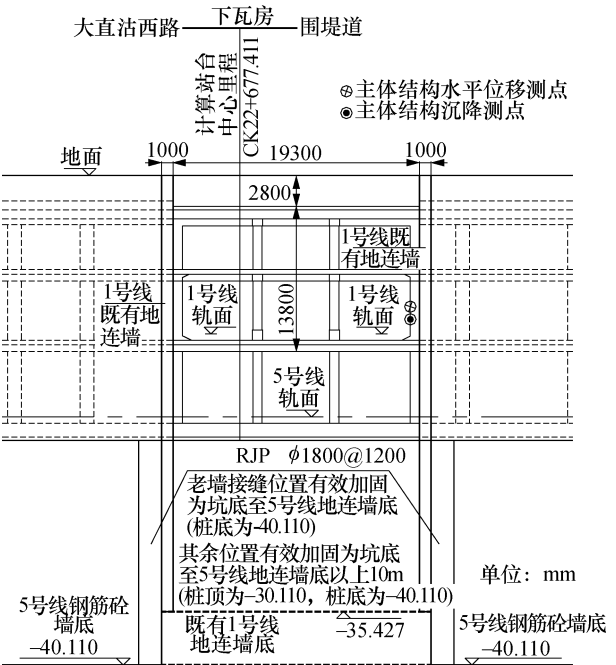


图 3 既有车站换乘处剖面图

Fig.3 Cross-section profile of the existing station

地铁 1 号线主体结构侧移和沉降采用静力水准仪监测,测点布置于结构侧壁,沿 1 号线纵向每 15 m 设置 1 个监测断面(图 1 中 SGC-01~SGC-06 和 JGS-01~JGS-06).

该工程的施工难点如下.

1) 施工影响范围内存在粉土层,且地下水位高,施工中易造成流砂及管涌等事故,合理控制粉土层的开挖是控制变形的关键.各土层物理力学参数如表 1 所示,其中⑥₃ 层粉土层工程力学性质较差,为软弱土层,施工时需谨慎.

表 1 土层物理力学参数

Tab.1 Physical and mechanical parameters of soil layers

土层名称	分层厚度 L / m	重度 γ / (kN/m ³)	泊松比 μ	压缩模量 E_s / MPa	有效黏聚力 c' / kPa	有效内摩擦角 φ' / (°)
① ₁	3.9	16.00	0.33	—	0	15.00
④ ₁	1.6	19.55	0.36	5.31	9.00	20.40
⑥ ₃	2.8	19.65	0.32	9.50	5.00	29.60
⑥ ₄	6.0	19.11	0.36	4.90	6.70	22.70
⑦	1.4	19.42	0.33	4.61	8.00	19.80
⑧ ₁	4.8	19.73	0.31	5.00	10.22	23.84
⑨ ₁	7.5	19.67	0.30	5.86	5.91	25.30
⑨ ₂	1.8	20.11	0.30	11.70	5.53	32.90
⑩	1.7	19.98	0.31	5.20	10.00	25.29
⑪ ₁	6.5	20.46	0.28	6.50	16.81	20.40
⑪ ₂	2.8	20.16	0.30	13.74	4.00	32.60
⑪ ₃	5.7	20.45	0.31	6.10	12.0	23.00

2) 换乘处既有 1 号线下瓦房站对变形的要求高:为减小基坑施工对既有车站的影响,在换乘处采用 ϕ 1 800 mm@1 200 RJP 大直径旋喷桩止水加固,在阳角处设置三重管旋喷桩加固至坑底下 4 m,以保护阳角不被破坏.

基坑分层分段施工,从两端向中间(既有车站)采用倒退台阶接力法施工.根据时空效应原理,应尽量减小无支护开挖的时间,沿着基坑长边方向每小块开挖长度约 20 m,每小段包含 2~5 根支撑.基坑开挖主要阶段根据支撑埋深分为 7 步,如表 2 所示.为尽可能控制地下连续墙的侧向变形,要保证及时施作支撑并预加轴力,由图 2 可知,基坑首道支撑为钢筋混凝土支撑,其余为钢支撑,钢支撑的预加轴力约为设计值的 50%~70%.

表 2 基坑开挖主要阶段

Tab.2 Main stages of foundation pit excavation

阶段	时间	施工内容	增量开挖深度/m
1(a)	2014-01-09— 2014-01-10	一步土	1.15
1(b)	2014-01-10— 2014-01-15	冠梁、一步土混凝土支撑	
2(a)	2014-01-16— 2014-01-18	二步土一段	6.13
2(b)	2014-01-19— 2014-01-23	二步土一段腰梁、支撑	
2(c)	2014-01-22— 2014-01-23	二步土二段	
2(d)	2014-01-24— 2014-01-28	二步土二段腰梁、支撑	
2(e)	2014-01-26— 2014-01-28	二步土三段	
2(f)	2014-01-29— 2014-02-03	二步土三段腰梁、支撑	
3	2014-01-24— 2014-02-07	混凝土养护期 (以一段达到 15 d 为准)	0
4(a)	2014-02-08— 2014-02-11	三步土一段	6.20
4(b)	2014-02-12— 2014-02-16	三步土一段支撑	
4(c)	2014-02-17— 2014-02-20	三步土二段	
4(d)	2014-02-21— 2014-02-25	三步土二段支撑	
4(e)	2014-02-26— 2014-03-02	三步土三段	
4(f)	2014-03-03— 2014-03-09	三步土三段支撑	
5(a)	2014-03-10— 2014-03-14	四步土一段 (一段支撑已完成 21 d)	5.20
5(b)	2014-03-15— 2014-03-19	四步土一段支撑	
5(c)	2014-03-20— 2014-03-24	四步土二段	
5(d)	2014-03-25— 2014-03-29	四步土二段支撑	
5(e)	2014-03-30— 2014-04-04	四步土三段	
5(f)	2014-04-05— 2014-04-10	四步土三段支撑	
6	2014-04-11— 2014-04-16	养护期	0
7(a)	2014-04-17— 2014-04-22	五步土一段 (一段支撑已完成 22 d)	5.14
7(b)	2014-04-23— 2014-05-07	五步土一段支撑	
7(c)	2014-05-08— 2014-05-13	六步土	
7(d)	2014-05-14— 2014-05-19	五步土二段	
7(e)	2014-05-20— 2014-05-25	五步土三段	

2 围护结构水平位移规律分析

图 4 为埋深 15 m 处墙体水平位移历时曲线,水平位移控制标准为±20 mm,向基坑内侧位移为正,外侧为负.图 5 为分步开挖各测点水平位移分布情况.

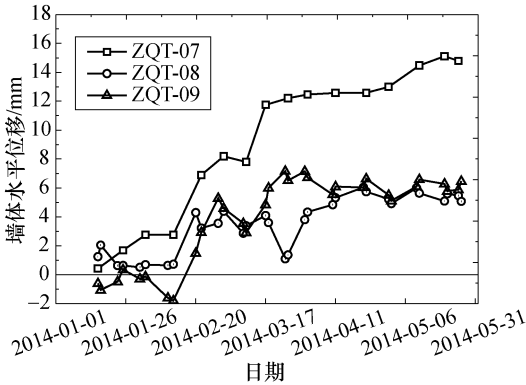
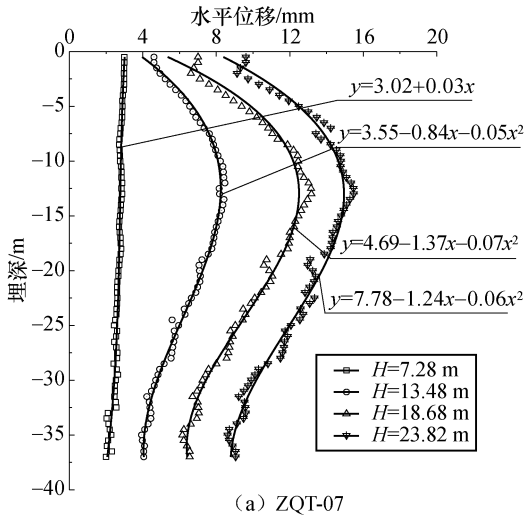
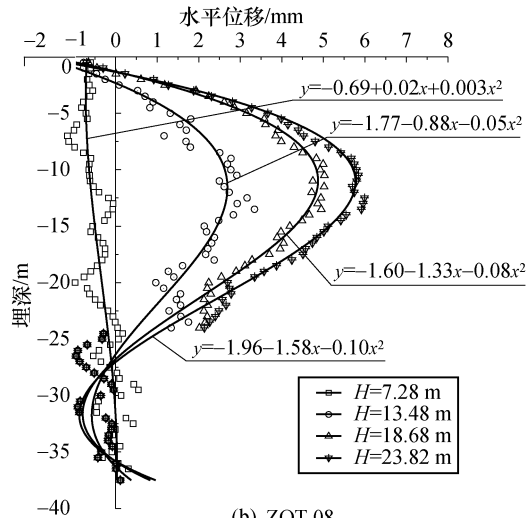


图 4 埋深 15 m 处墙体水平位移历时曲线

Fig.4 Horizontal displacements durationcurves of the diaphragm wall 15 m below ground surface



(a) ZQT-07



(b) ZQT-08

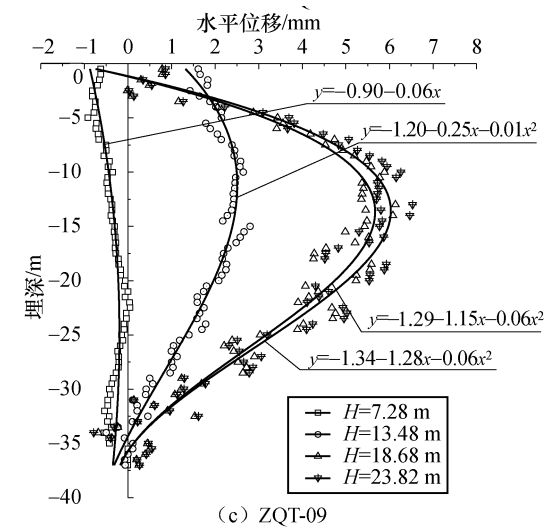


图 5 分步开挖各测点水平位移分布

Fig.5 Horizontal displacement distribution of each measuring point during excavation

由图 4 知,随着开挖时间的增加,基坑开挖深度增加,围护结构水平位移增大,但增大速率逐渐减小.距既有车站较近的测点 ZQT-07 最终水平位移最大,ZQT-08 和 ZQT-09 最终水平位移大小相近.由图 5 可知,随着开挖深度 H 的增加,墙体变形模式从悬臂型变为内凸型,其中靠近既有结构的墙体水平变形最大.采用二次多项式对各测点的拟合(拟合表达式见图 5)效果较好,与李淑^[17]对北京地区深基坑围护结构变形的研究结果一致.由图 5 可得不同开挖深度时墙体水平位移最大值及其埋深,如表 3 所示.

表 3 不同开挖深度时墙体水平位移最大值及其埋深
Tab.3 The maximum horizontal displacement of the diaphragm wall and its depth under different excavation depths

开挖深度/m	最大位移/mm			最大位移埋深/m		
	ZQT-07	ZQT-08	ZQT-09	ZQT-07	ZQT-08	ZQT-09
7.28	2.99	-0.72	0.87	1.12	3.39	0
13.48	8.47	2.69	2.51	16.79	11.57	11.24
18.68	13.18	4.87	5.67	14.75	10.98	13.65
23.82	15.48	5.78	6.03	14.93	11.06	13.58

由图 5 及表 3 可得以下结论.

1) 基坑开挖初期,开挖深度较浅,墙体侧移模式均为悬臂型,其中 ZQT-07 向基坑内侧偏转,ZQT-08 和 ZQT-09 向基坑外侧偏转,这是因为 ZQT-07 临近既有车站,导致首道内支撑的作用不明显.墙顶水平位移最大,且 ZQT-07 水平位移较 ZQT-08 和 ZQT-09 的水平位移大.

2) 开挖深度达到 13.48 m 及以后,各测点变形模式均为向坑内鼓出的内凸型.ZQT-07 和 ZQT-08 的增量位移占最终位移的比例最大,分别为 35%和

59%.ZQT-08 墙趾附近出现向坑外挤出的位移,位移较小,其原因可能是基坑围护结构刚度较大使得墙趾出现微小的踢脚型变形.

3) 开挖深度为 18.68 m 时,ZQT-09 的增量位移占最终位移的比例最大,为 52%,其原因是开挖范围内存在粉土层(⑥₃),对施工有不利影响.

4) 开挖完成后 ZQT-07、ZQT-08 和 ZQT-09 最大水平位移分别为 15.48 mm (0.064% H), 5.78 mm (0.024% H) 和 6.03 mm (0.025% H), 远小于以往工程实例统计结果^[18-19].最大位移埋深分别为 0.62 H 、0.46 H 和 0.57 H .

3 墙后地表沉降规律分析

分步开挖各测点墙后地表沉降分布见图 6.图 6 中“点”为实测值,“线”是根据实测值拟合得到的.可见,随着开挖深度的增加,墙后地表沉降模式均从三

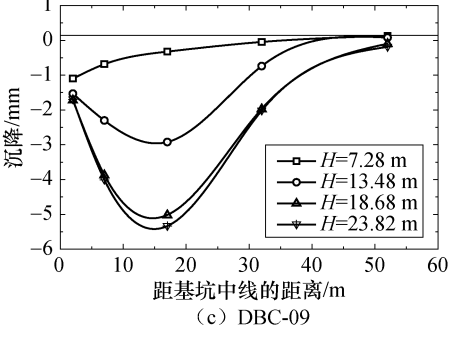
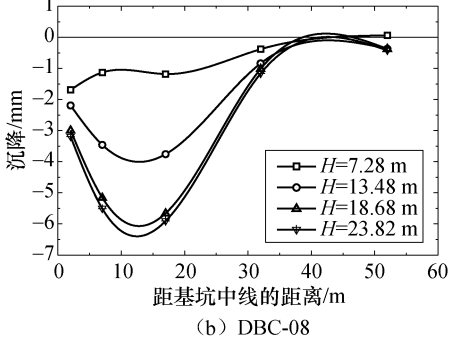
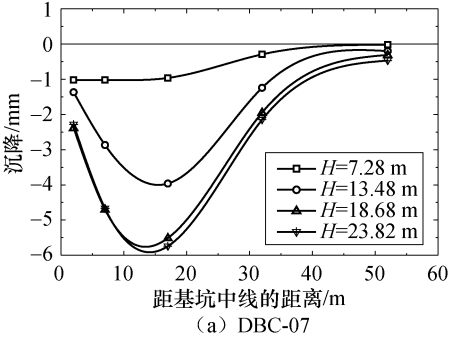


图 6 分步开挖各测点地表沉降分布
Fig.6 Ground surface settlement distribution of each measuring point during excavation

角型变为凹槽型,沉降影响范围约 $2H$,隆起为正,沉降为负.由图 6 可得以下结论.

1)开挖完成后 DBC-07 地表最大沉降 5.74 mm ($0.024\% H$)位于墙后 17 m (约 $0.71H$),沉降槽影响范围达 $2H$.开挖深度达 13.48 m 时的增量沉降最大,占最终总沉降的 51%,较围护墙增量水平位移 35%大,可见粉土层对地表变形的影响较大.为控制墙后地表变形,需重点控制施工过程中软弱地层的开挖及支护.

2)在墙后 17 m (约 $0.71H$),DBC-08 墙后地表沉降值达到最大 5.91 mm ($0.025\% H$),沉降槽影响范围为 $2H$,这是因为 DBC-08 位于基坑长边中点,受两端墙的横向约束小,沉降最大.

3)DBC-09 的墙后地表最大沉降为 5.35 mm ($0.022\% H$),位于墙后 17 m (约 $0.71H$),沉降槽影响范围为 $2H$.与 DBC-07 和 DBC-08 相比,DBC-09 的墙后地表最大沉降较小,这是由于基坑坑角对邻近地表沉降的约束类似于既有车站对地表沉降的约束,且效果明显.

综上所述,围护结构和墙后地表变形随着开挖深度的增加而不断发展,当围护墙变形模式为悬臂型时,墙后地表沉降曲线为三角型;当围护墙变形模式为内凸型时,墙后地表变形模式为凹槽型.

开挖完成后墙后地表最大沉降 δ_{vmax} 与围护墙最大水平位移 δ_{hmax} 对比如表 4 所示.由表 4 可知:基坑临近既有车站围护结构水平位移较大,墙后地表最大沉降与围护结构最大水平位移的比值较小,其他位置该比值接近,平均值约为 0.77,介于 Mana 等^[20]统计的结果 0.5~1.0 之间.

表 4 墙后地表最大沉降与围护墙最大水平位移对比

Tab.4 Comparison between the maximum settlement of ground surface and the maximum horizontal displacement of diaphragm wall

监测点	δ_{vmax}	δ_{hmax}	$\delta_{vmax}/\delta_{hmax}$
DBC-07	$0.024\% H$	$0.064\% H$	0.38
DBC-08	$0.025\% H$	$0.024\% H$	1.04
DBC-09	$0.022\% H$	$0.025\% H$	0.88

4 既有车站变形规律分析

基坑开挖邻近既有车站时,既有车站不可避免地受到施工扰动而产生水平和竖向位移,这是由既有车站对邻近土体扰动引起的.不同开挖深度下既有车站水平和竖向位移如图 7 所示,横坐标为既有车站结构测点距基坑中线的距离,其中 0~11.15 m 在换乘站内.水平位移以向车站外侧为正,内侧为负,竖向位移以隆起为正,沉降为负.由图 7 可知,既

有车站水平位移随基坑开挖深度的增加而增大,竖向位移随开挖深度的增加先增大,后减小.

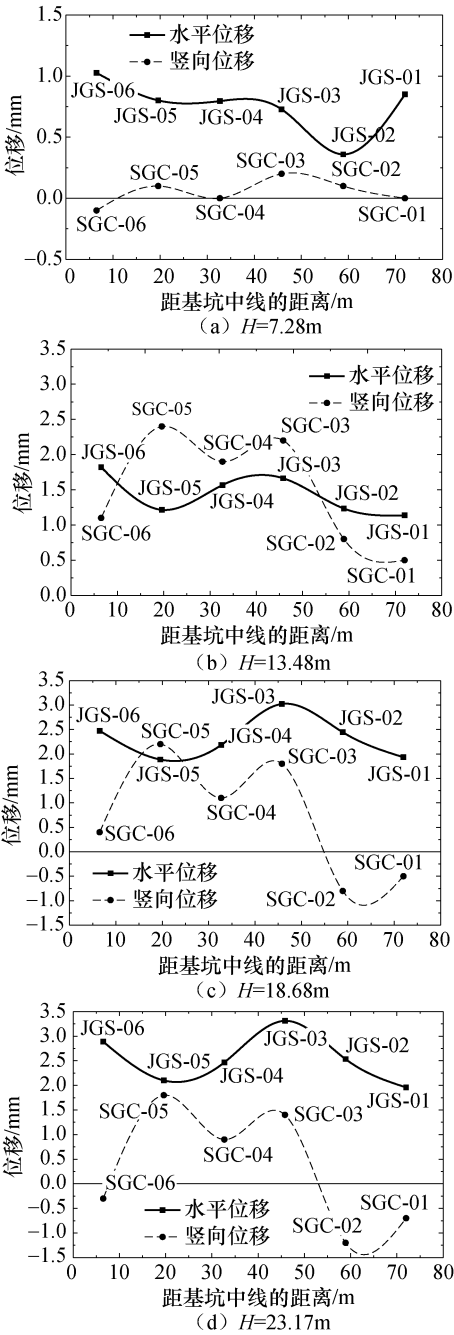


图 7 不同开挖深度下既有车站水平和竖向位移

Fig.7 Horizontal and vertical displacement of the existing station under different excavation depths

根据既有车站位移变化特征,可将其变形分为以下 3 个阶段.

1)水平变形为主阶段:当基坑开挖深度小于 7.28 m 时,既有车站竖向变形较小,主要是水平变形.可见,土层条件较好,基坑开挖深度较小时,墙后土体位移主要为水平方向.

2)竖向变形迅速增大阶段:当基坑开挖深度达到 13.48 m 时,既有车站竖向变形与水平变形相近.

由于开挖范围内存在地层条件较差的软弱土层,既有车站竖向位移迅速增大,与水平位移接近。换乘处竖向位移小于水平位移,基坑中线后(20~50 m)既有车站发生较大隆起,最大隆起量为 2.4 mm,50 m 后车站隆起较小,水平位移变化较小。

3)水平变形增大,竖向变形减小阶段:当基坑开挖深度达到 18.68 m 时,随着开挖深度的增加,既有车站隆起量减小,水平位移继续增大,两者都发生较大变化。

基坑开挖完成后,既有车站变形如图 7(d)所示,换乘段地表(0~10 m)竖向位移较小;基坑中心线后(20~50 m)地表隆起,最大隆起量为 1.8 mm,与邻近既有车站的墙后地表变形最大值位置一致;墙后(50~90 m)地表发生沉降,沉降量较小。基坑开挖完成后,既有车站结构水平变形最大值为 3.3 mm,位于基坑中心线后 44 m 处,而不是换乘处,其原因是在换乘处对既有车站进行了 RJP 水平旋喷桩止水加固处理,约束了既有车站的水平变形。可见,及时对既有结构采取加固措施,可有效减小结构位移。

既有车站刚度较大,最大竖向差异变形仅 3 mm,最大水平差异变形为 1.3 mm,均控制在标准值 4 mm 以内。

5 结 论

本文以天津地区复杂地层条件下与既有车站十字换乘的新建地铁车站深基坑工程为研究背景,通过对基坑开挖阶段的围护结构、墙后地表及既有车站水平和竖向位移进行现场监测与实测数据分析,得到如下结论。

1)基坑围护结构变形模式在开挖深度较小时为悬臂型,围护结构最大水平位移位于墙顶;开挖深度较大时为内凸型,最大水平位移约 $0.064\% H$ (H 为基坑开挖深度),位于地表下约 $0.63H$ 。

2)墙后地表最大沉降约 $0.025\% H$,在墙后约 $0.71H$ 沉降值达到最大,沉降槽影响范围约为 $2H$ 。墙后地表最大沉降与围护结构最大水平位移的平均比值为 0.77,靠近既有车站位置处,该比值较小。

3)既有车站水平变形为向外鼓出,随着开挖深度的增加而增大,由于既有车站刚度较大,差异变形较小;既有车站竖向变形主要为隆起,远离基坑处有轻微沉降。

4)基坑围护结构、墙后地表和既有车站变形的联系和区别:当基坑开挖深度较小时,基坑围护墙发生悬臂型变形,墙后地表变形模式为三角型,既有车站主要为水平变形;当基坑开挖深度增加时,基坑围护

墙水平变形为内凸型,墙后地表变形模式为凹槽型,既有车站的水平位移和竖向位移相当;当基坑开挖深度进一步增大时,既有车站的水平位移增大,竖向位移减小,既有车站竖向变形最大值位置约在基坑中线后 20 m,水平变形最大值位置约在基坑中线后 45 m,滞后于邻近地表沉降最大值位置(墙后 12 m)。

5)为减小基坑开挖对墙后土体和既有车站的扰动,可采取既有车站周围止水加固,或加固墙后软弱土层等措施,尽量避免墙后既有构筑物出现在地表沉降最大值位置。

参考文献 (References):

- [1] 李明广, 徐安军, 董锋, 等. 下穿运营高铁及地铁的交通枢纽深基坑数值分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(增 2): 386—390.
LI Mingguang, XU Anjun, DONG Feng, et al. Numerical study on a deep excavation of transportation hub underlying operating railways and a metro station [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(S2): 386—390. (in Chinese)
- [2] 王志杰, 徐瑞宁. 基坑开挖对紧贴既有地铁车站的影响分析[J]. 公路, 2015(4): 299—302.
WANG Zhijie, XU Ruining. Analysis on the influence of foundation pit excavation on existing subway stations [J]. Highway, 2015(4): 299—302. (in Chinese)
- [3] 胡军. 深基坑开挖对邻近既有高铁桩基影响研究[J]. 铁道工程学报, 2017, 34(6): 12—17.
HU Jun. Research on the influence of excavation of deep foundation pit to adjacent existing high-speed railway bridge pile foundations stability [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2017, 34(6): 12—17. (in Chinese)
- [4] 曾远, 李志高, 王毅斌. 基坑开挖对邻近地铁车站影响因素研究[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 8(4): 642—645.
ZENG Yuan, LI Zhigao, WANG Yibin. Research on influencing factors of deep excavation adjacent to subway station [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 8(4): 642—645. (in Chinese)
- [5] 高盟, 高广运, 冯世进, 等. 基坑开挖引起紧贴运营地铁车站的变形控制研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(6): 818—823.
GAO Meng, GAO Guangyun, FENG Shijin, et al. Control of deformation of operating subway station induced by adjacent deep excavation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(6): 818—823. (in Chinese)
- [6] 刘燕, 聂淑敏, 刘涛. 既有地下结构对基坑位移的遮拦效应研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(增 2): 400—404.

- LIU Yan, NIE Shumin, LIU Tao. Sheltering effect of existing subsurface structures on displacement of retaining wall of foundation pits[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(S2): 400—404.(in Chinese)
- [7] 陈树林, 张峰, 代楠. 紧邻既有结构的深基坑受力变形特性分析[J]. 上海交通大学学报, 2016, 50(10): 1658—1664.
- CHEN Shulin, ZHANG Feng, DAI Nan. Studies on stress and deformation behaviors of deep excavations adjacent to substructures[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2016, 50(10): 1658—1664.(in Chinese)
- [8] 伍尚勇, 杨小平, 刘庭金. 双侧深基坑施工对紧邻地铁隧道变形影响的分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增1): 3452—3458.
- WU Shangyong, YANG Xiaoping, LIU Tingjin. Analysis of influence on deformation of adjacent subway tunnel due to bilateral deep excavations[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(S1): 3452—3458.(in Chinese)
- [9] 郑刚, 王琦, 邓旭, 等. 不同围护结构变形模式对坑外既有隧道变形影响的对比分析[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(7): 1181—1194.
- ZHENG Gang, WANG Qi, DENG Xu, et al. Comparative analysis of influences of different deformation modes of retaining structures on deformation of existing tunnels outside excavations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(7): 1181—1194.(in Chinese)
- [10] 郑刚, 刘庆晨, 邓旭, 等. 基坑开挖对下卧运营地铁既有箱体影响的实测及分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(4): 1109—1118.
- ZHENG Gang, LIU Qingchen, DENG Xu, et al. Field measurement and analysis of effect of excavation on existing tunnel boxes of underlying metro tunnel in operating[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(4): 1109—1118.(in Chinese)
- [11] 郭海柱, 张庆贺, 朱继文, 等. 地铁十字换乘车站施工关键技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增1): 3229—3236.
- GUO Haizhu, ZHANG Qinghe, ZHU Jiwen, et al. Study on key techniques for construction of metro crossing transfer station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(S1): 3229—3236.(in Chinese)
- [12] 唐长东, 杨小平, 刘庭金. 紧贴地铁车站单侧深基坑的施工方案对比研究[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(5): 1121—1126.
- TANG Zhangdong, YANG Xiaoping, LIU Tingjin. Study on construction scheme of one-side foundation pit engineering adjacent to metro station[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(5): 1121—1126.(in Chinese)
- [13] 朱炎兵, 周小华, 魏世锋, 等. 临近既有地铁车站的基坑变形性状研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(10): 2997—3002.
- ZHU Yanbing, ZHOU Xiaohua, WEI Shifeng, et al. Investigation on deformation behaviors of foundation pit adjacent to existing metro stations[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(10): 2997—3002.(in Chinese)
- [14] 谢秀栋, 刘国彬, 李志高, 等. 邻近运营地铁车站基坑开挖土层位移特性分析[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(4): 742—744.
- XIE Xiudong, LIU Guobin, LI Zhigao, et al. Analysis of soil layers displacement characteristics in foundation pit adjacent to subway station[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(4): 742—744.(in Chinese)
- [15] 胡安峰, 张光建, 王金昌, 等. 地铁换乘车站基坑围护结构变形监测与数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(增1): 77—81.
- HU Anfeng, ZHANG Guangjian, WANG Jinchang, et al. Monitoring and numerical simulation of deformation of retaining structure excavation of a metro transfer station[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(S1): 77—81.(in Chinese)
- [16] LIU G B, HUANG P, SHI J W, et al. Performance of a deep excavation and its effect on adjacent tunnels in Shanghai soft clay[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2016, 30(6): 1—14.
- [17] 李淑. 基于变形控制的北京地铁车站深基坑设计方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.
- LI Shu. Study on design of Beijing subway station deep excavation based on deformation controlling[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013.(in Chinese)
- [18] CLOUGH G W, THOMAS D, ROURKE O. Construction induced movements of instu walls[C]// Proceeding of the ASCE Conference on Design and Performance of Earth Retaining Structures. New York, 1990: 439—470.
- [19] LIU G B, NG C W, WANG Z W. Observed performance of a deep multistrutted excavation in Shanghai soft clays[J]. Journal Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(8): 1004—1013.
- [20] MANA A I, CLOUGH G W. Prediction of movement for braced cuts in clay[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1981, 107(6): 759—777.